

**Л.И. ДВОРКИН, О.Л. ДВОРКИН**

# **СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

*Учебно-практическое пособие*

**Инфра-Инженерия  
Москва  
2013**

**УДК 691**  
**ББК 38.3**  
**Д24**

**Рецензенты:** доктор технических наук, профессор *Калашников В.И.* (Пензенский государственный университет архитектуры и строительства); доктор технических наук, профессор *Плугин А.А.* (Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г. Харьков).

**Дворкин Л.И., Дворкин О.Л.**

Д 24 Строительное материаловедение. – М.: Инфра-Инженерия, 2013. – 832 с.

ISBN 978-5-9729-0064-0

В учебно-практическом пособии приведены научные основы строительного материаловедения и характеристика основных материалов, применяемых в современном строительстве.

Освещаются теоретические представления о структуре и составе строительных материалов, процессах структурообразования и механизме синтеза важнейших свойств. Рассматриваются пути их прогнозирования и регулирования свойств строительных материалов.

Последовательно излагаются строительно-техническая характеристика материалов и изделий, основные нормативные требования к ним, способы их получения и модифицирования.

Книга предназначена для студентов и аспирантов строительных университетов и факультетов, а также инженерно-технических работников строительных организаций.

© Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., авторы, 2013  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2013

ISBN 978-5-9729-0064-0

## СОДЕРЖАНИЕ

---

|                                                                                                         |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Предисловие</b> . . . . .                                                                            | <b>6</b>   |
| <b>Введение</b> . . . . .                                                                               | <b>7</b>   |
| <b>ЧАСТЬ I. ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ</b> . . . . .                                         | <b>14</b>  |
| <b>1. Классификация и стандартизация строительных материалов</b> . . . . .                              | <b>14</b>  |
| 1.1 Основные понятия и классификация строительных материалов . . . . .                                  | 14         |
| 1.2 Стандартизация и оценка качества материалов . . . . .                                               | 20         |
| 1.3 Строительные материалы как стохастические объекты ..                                                | 25         |
| <b>2. Структура строительных материалов</b> . . . . .                                                   | <b>29</b>  |
| 2.1 Атомно-молекулярная структура материалов. . . . .                                                   | 29         |
| 2.2 Наноструктура материалов . . . . .                                                                  | 45         |
| 2.3 Микроструктура материалов . . . . .                                                                 | 52         |
| 2.4 Макроструктура материалов . . . . .                                                                 | 59         |
| <b>3. Общие свойства строительных материалов</b> . . . . .                                              | <b>65</b>  |
| 3.1 Механические свойства . . . . .                                                                     | 65         |
| 3.2 Физические свойства . . . . .                                                                       | 85         |
| 3.3 Химические свойства . . . . .                                                                       | 111        |
| <b>4. Обоснование составов и технологических параметров получения строительных материалов</b> . . . . . | <b>114</b> |
| 4.1 Термодинамический метод и диаграммы состояния . .                                                   | 114        |
| 4.2. Моделирование в исследованиях строительных материалов . . . . .                                    | 124        |
| <b>5. Физико-химические и технологические процессы получения строительных материалов</b> . . . . .      | <b>138</b> |
| 5.1 Физико-химические процессы . . . . .                                                                | 138        |
| 5.2 Основные технологические процессы . . . . .                                                         | 147        |
| <b>ЧАСТЬ II. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> . . . . .                              | <b>175</b> |
| <b>6. Природные каменные материалы</b> . . . . .                                                        | <b>175</b> |
| 6.1. Виды и свойства минералов . . . . .                                                                | 176        |

|                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2. Горные породы . . . . .                                              | 184        |
| 6.3. Свойства горных пород и виды природных каменных материалов . . . . . | 200        |
| 6.4. Долговечность природных каменных материалов . . .                    | 215        |
| <b>7. Керамические материалы . . . . .</b>                                | <b>218</b> |
| 7.1. Составы керамических масс . . . . .                                  | 218        |
| 7.2. Процессы обжига и спекания . . . . .                                 | 226        |
| 7.3. Структура и свойства керамических материалов . . .                   | 230        |
| 7.4. Основные виды строительных керамических материалов                   | 239        |
| <b>8. Стекло и стеклокристаллические материалы . . . . .</b>              | <b>265</b> |
| 8.1. Силикатные расплавы и стеклообразное состояние . .                   | 265        |
| 8.2. Виды стекол. Свойства строительного стекла . . . . .                 | 269        |
| 8.3. Строительные изделия из стекла . . . . .                             | 283        |
| 8.4. Волокнистые материалы из силикатных расплавов                        | 302        |
| 8.5. Стеклокристаллические материалы . . . . .                            | 309        |
| <b>9. Металлические материалы. . . . .</b>                                | <b>315</b> |
| 9.1. Структура металлов и сплавов . . . . .                               | 316        |
| 9.2. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов . .                   | 322        |
| 9.3. Углеродистые и легированные стали . . . . .                          | 326        |
| 9.4. Термическая обработка стали . . . . .                                | 344        |
| 9.5. Чугуны . . . . .                                                     | 351        |
| 9.6. Сплавы цветных металлов. . . . .                                     | 355        |
| 9.7. Коррозия металлов. . . . .                                           | 360        |
| <b>10. Минеральные вяжущие вещества . . . . .</b>                         | <b>364</b> |
| 10.1. Гипсовые вяжущие материалы. . . . .                                 | 364        |
| 10.2. Строительная известь и известесодержащие вяжущие .                  | 377        |
| 10.3. Жидкое стекло. Магнезиальные и фосфатные вяжущие .                  | 387        |
| 10.4. Шлаковые вяжущие . . . . .                                          | 397        |
| 10.5. Портландцемент . . . . .                                            | 404        |
| 10.6. Разновидности цементов. . . . .                                     | 432        |
| <b>11. Композиционные материалы на основе вяжущих веществ. . . . .</b>    | <b>457</b> |



|                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 11.1. Бетоны . . . . .                                                      | 457        |
| 11.2. Разновидности бетонов . . . . .                                       | 518        |
| 11.3. Армированные композиционные материалы . . . . .                       | 544        |
| 11.4. Материалы на основе нецементных вяжущих . . . . .                     | 568        |
| 11.5. Строительные растворы. . . . .                                        | 586        |
| 11.6. Сухие строительные смеси. . . . .                                     | 604        |
| <b>12. Материалы на основе древесины . . . . .</b>                          | <b>612</b> |
| 12.1. Строение и свойства древесины. . . . .                                | 612        |
| 12.2. Лесо- и пиломатериалы. Изделия из древесины . . . . .                 | 629        |
| 12.3. Материалы из клееной древесины. . . . .                               | 639        |
| 12.4. Материалы на основе измельченной древесины . . . . .                  | 648        |
| <b>13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их<br/>основе. . . . .</b> | <b>668</b> |
| 13.1. Битумные вяжущие. . . . .                                             | 668        |
| 13.2. Дегтевые и композиционные вяжущие. Эмульсии и<br>пасты. . . . .       | 680        |
| 13.3. Асфальтовые материалы. . . . .                                        | 687        |
| 13.4. Рулонные кровельные и гидроизоляционные материалы                     | 706        |
| <b>14. Полимерные материалы. . . . .</b>                                    | <b>715</b> |
| 14.1. Синтетические полимеры. . . . .                                       | 716        |
| 14.2. Состав и свойства пластмасс. . . . .                                  | 739        |
| 14.3. Основные виды строительных полимерных материалов .                    | 753        |
| 14.4. Полимерные клеи, мастики и бетоны. . . . .                            | 778        |
| <b>15. Лакокрасочные и оклеечные материалы. . . . .</b>                     | <b>793</b> |
| 15.1. Классификация и свойства. . . . .                                     | 793        |
| 15.2. Характеристика основных компонентов. . . . .                          | 797        |
| 15.3. Основные виды красок и лаков. . . . .                                 | 803        |
| 15.4. Оклеечные материалы . . . . .                                         | 810        |
| <b>Литература. . . . .</b>                                                  | <b>814</b> |
| <b>Предметный указатель. . . . .</b>                                        | <b>816</b> |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Строительное материаловедение является составной частью строительной науки, на которой базируется современная строительная технология. Ее теоретическим фундаментом является комплекс фундаментальных наук, изучающих строение и свойства материальных объектов.

В системе профессиональной подготовки специалистов-строителей “Строительное материаловедение” является базовой научной дисциплиной, без овладения которой невозможно дальнейшее изучение других специальных дисциплин. В учебных планах подготовки специалистов-строителей в последние годы “Строительное материаловедение” заменило близкий, но не идентичный традиционный курс “Строительные материалы”. В отличие от последнего в нем строительно-технологическая характеристика отдельных материалов увязывается с общими закономерностями, характеризующими влияние структуры и состава материалов на их свойства. Разработке такого курса способствовали обстоятельные теоретические исследования, выполненные в различных странах с помощью современных физико-химических методов.

Стремясь удовлетворить неуклонно возрастающие требования строительной практики, наука о строительных материалах динамично развивается, обогащается новыми экспериментальными данными и результатами внедрения передовых технологий.

Данная книга является в значительной мере результатом многолетней научно-педагогической и научно-исследовательской работы авторов. Авторы благодарны рецензентам, замечания которых учтены при подготовке книги к изданию. Они будут благодарны также всем читателям за замечания, направленные на улучшение содержания книги при ее возможном переиздании в будущем.

Строительное материаловедение – наука, изучающая связи между составом, структурой и свойствами материалов и закономерности их изменения под воздействием различных факторов.

Строительное материаловедение сформировалось в результате накопления обширного фактического материала, обусловившего возможность перехода от частных зависимостей, характеризующих технологию, структуру, свойства отдельных видов материалов к общим закономерностям, справедливым для всей совокупности строительных материалов или больших их групп.

Люди начали изготавливать искусственные строительные материалы в глубокой древности. Изделия из обожженной глины были найдены в раскопках, имевших возраст около 15 тыс. лет до нашей эры, а как промышленный продукт они были широко распространены в Египте около 5 тыс. лет до н.э. Изделия, сформованные из стекла были известны в период 12-5 тыс. лет до н.э., а около 2 тыс. лет до н.э. имелась уже стекольная промышленность.

Примерно 4-3 тыс. лет до н.э. появились вяжущие вещества, полученные путем обжига. Первыми из них были строительный гипс, получаемый обжигом гипсового камня, а затем воздушная известь, изготовленная путем обжига известняка при более высокой температуре. Египтяне применяли гипс при возведении пирамид и других монументальных сооружений. Они изготавливали растворы также на основе извести.

Условно можно выделить 3 периода развития строительного материаловедения:

Первый период начинается в глубокой древности, когда древнегреческими философами Демократом (около 460 г. до н.э.) и Эпикуром (341-270 гг. до н.э.) в результате наблюдений за свойствами природных камней, керамики, металлов было предложено учение об атомном строении различных веществ.

Уже в известных древнеримских трактатах значительное место отводилось строительному искусству в т.ч. получению строительных материалов. Изучение древнеримских трактатов спустя многие столетия, когда уже была создана определенная научная база способствовало развитию некоторых фундаментальных идей строительного материаловедения, например, идеи пуццоланизации цементов, растворов и бетонов с целью увеличения их водо- и коррозионной стойкости, вве-

дения органических добавок в растворы и бетоны для увеличения их пластичности и долговечности и др.

Известно, что средневековые характеризовались определенным снижением уровня строительных технологий, качества применяемых материалов. Развитие научного материаловедения стало возможным лишь после того, как были сформулированы основные закономерности естественных наук, определяющие строение и свойства веществ, условия прохождения и особенности химического взаимодействия веществ, процессов растворения, кристаллизации, спекания, плавления и др.

В России значительный вклад в формирование науки о строительных материалах был сделан великим естествоиспытателем М.В. Ломоносовым.

В 1748 г. М.В. Ломоносовым создана первая в России химическая лаборатория, где проводилась интенсивная исследовательская работа по химии и технологии стекла. В 1748-1752 гг. он разработал более 2000 составов цветных стекол.

М.В. Ломоносов в своем “Курсе истинной физической химии” дал научное обоснование процессов спекания, стеклообразования, обжига и окраски стекол.

В этот же период успешно работает в области керамики Д.И. Виноградов. В его работе “обстоятельное описание чистого порцелана” (1752 г.). Он описывает рецепты и технологию изготовления высококачественного фарфора и глазурей.

С развитием строительства и промышленности в развивающихся странах во второй половине XVIII в, прежде всего, в Великобритании связаны разработки технологий и исследования новых строительных материалов. Крупнейший вклад в развитие технологии и науки о вяжущих материалах, растворах и бетонах сделан английскими исследователями Д. Смитом и Д. Паркером, предложившими гидравлическую известь и роман-цемент.

В 1818 г. французский ученый Луи Жозеф Вика опубликовал работу “Экспериментальные исследования строительных известей, бетонов и обычных растворов”. В ней предложена классификация гидравлических известей в зависимости от массового соотношения кремнезема и глинозема к оксиду кальция. Эта классификация применяется до настоящего времени.

Французский инженер, профессор Петербургского института корпуса инженеров путей сообщения Антуан де Шарлевиль опубликовал в 1822 г. “Трактат об искусстве изготовлять хорошие строительные

растворы”, в котором приводит результаты исследований известковых пород Петербургской губернии с целью получения воздушной и гидравлической извести. В трактате излагаются основы технологии получения гидравлических добавок, способ подбора состава растворов.

Идея получения гидравлического вяжущего обжигом искусственной смеси известнякового и глинистого компонента была развита независимо друг от друга Джозефом Аспдином (Англия) и Егором Челиевым (Россия). Д. Аспдин получил (1824 г.) патент на “усовершенствование способа получения искусственного камня”, которое названо им портландцементом (из-за сходства с известняками из каменоломен на острове Портленд). Д. Аспдин рекомендовал изготавливать цемент из известняковой пыли, собранной на дорогах, вымощенных известняком, которую после обжига на известь смешивают с глиняным шламом. Массовое соотношение компонентов в патенте не указывалось, а обжиг смеси рекомендовался лишь до полного удаления  $\text{CO}_2$ . Цемент Д. Аспдина был использован в 1828 г. в работах по постройке тоннеля под Темзой.

В сотую годовщину изобретения Аспдина в зале Городского Совета Лидса Американской портландцементной ассоциацией была установлена мемориальная бронзовая доска «В память Джозефа Аспдина из Лидса, ... чье изобретение портландцемента... с последующим в течение столетия усовершенствованием в его производстве и использовании сделало весь мир его должником».

Е. Челиев предложил изготавливать цемент из смеси извести и глины при тщательном смешивании компонентов и обжиге при температуре “белого жара” (1100-1200°C). Для улучшения качества готового цемента Е. Челиев рекомендовал добавлять в него гипс. Цемент Е. Челиева был использован в восстановительных работах в Москве после войны 1812 г. Результаты работы Е. Челиева изложены в книге “Полное наставление как изготавливать дешевый и лучший мергель или цемент, весьма прочный для подводных строений, как-то каналов, мостов, бассейнов, плотин, подвалов и штукатурки каменных и деревянных строений” (1825 г.).

Английский изобретатель И.Ч. Джонсон уже в 40-х годах XIX в. существенно усовершенствовал технологию портландцемента, найдя необходимое соотношение известняка и глины в сырьевой смеси и применив повышенную температуру для оплавления сырья и образования клинкера.

Второй этап развития науки о строительных материалах начинается со второй половины XIX в., когда сравнительно быстро развивается

производство новых материалов. На основе изобретения английского ученого У. Николя была сконструирована поляризационная призма и на ее основе в середине XIV в. создан поляризационный микроскоп, позволивший создать кристаллооптический метод изучения различных минералов. Первые капитальные труды по петрографии – науке о горных породах, являющихся основным сырьем для производства строительных материалов вышли в Германии (Ф. Циркель и Х. Розенбуш) и Франции (А. Мишель-Леви, Фуке).

В 1875 г. Е.С. Федоров создал теорию пространственных групп, определившую законы пространственной симметрии кристаллических решеток. Эта теория стала базовой для предложенного в 1912 г. рентгеноструктурного анализа. Выдающиеся работы по синтезу минералов, их систематике были выполнены Ф.Ю. Левинсоном-Лессингом. Позднее знаменитые работы по геохимии, имеющие неопределимое значение для развития физической химии и петрографии силикатов были выполнены В.И. Вернадским и А.Е. Ферсманом.

Развитие строительного материаловедения неразрывно связано с развитием техники испытаний и методов исследований. Основы физико-механических испытаний ведущих строительных материалов в России были разработаны Н.А. Белелюбским.

С 60-х годов XIX в. в строительстве все более господствующие позиции начинает занимать портландцемент.

Первые цементные заводы возникли в Англии, а затем производство цемента распространилось по всему миру. Основной агрегат для производства цементного клинкера – вращающаяся печь была изобретена в 1877 г. (патент Кремптона и Рэнсома). Одна из первых печей имела длину 11 м и диаметр 1,5 м, а в 1900 г. уже имелись печи диаметром 2 м и длиной 35 м. Их суточная производительность составляла 30 т (современные вращающиеся печи имеют диаметр до 7 м и длину до 230 м и производительность до 3000 т в сутки). Дробилку (мельницу) для измельчения клинкера изобрел в 1892 г. французский инженер Дэвидсен. Внутри она была футерована кварцевыми плитками, а в качестве мелющих тел использовалась морская галька.

В России первый цементный завод по производству портландцемента был построен в 1856 г. в Гродзце. В 60-х и последующих годах XIX в. были построены заводы в Риге, Новороссийске, Щурове, Брянске и других городах. Ко времени первой мировой войны цементные заводы России имели общую годовую производительность около 1,6 млн. т.

В 1898-1900 и 1913-1914 гг. Россия занимала по производству цемента третье место в Европе.

В конце XIX в. интенсивно развиваются экспериментальные исследования химико-минералогического состава цемента, предлагаются основные теоретические гипотезы механизма его твердения.

Известный французский химик Ле Шателье, используя оптические методы и X-лучи, показал в 1882 г., что портландцементный клинкер содержит 4 основных минерала, названных в 1897 г. Торнебомам алитом, белитом, целитом и фелитом. Ле Шателье в 1887 г. опубликовал кристаллизационную теорию твердения цемента. В этот же период (1893 г.) немецкий химик В. Михаэлис предлагает коллоидную теорию твердения.

В России в развитие науки о цементах и бетонах в XIX в. выдающийся вклад внесли Н.А. Белелюбский, Н.Н. Лямин, И.Г. Малюга, Д.И. Менделеев, А.Р. Шуляченко. В 1881 г. были разработаны первые русские нормы на портландцемент с методами определения его свойств. Д.И. Менделеевым в книге “Основы химии” (1868-1870 гг.) рассмотрен ряд вопросов химии цементов, и, в частности, сделана попытка объяснить гидравлические свойства цементов, высказан ряд важных предположений, например, о существовании среди силикатов соединений переменного состава, о возможности замещения в алюмосиликатах глинозема кремнеземом, которые затем были подтверждены экспериментально.

С 1872 г. стал выпускаться журнал “Зодчий”, а с 1903 г. – журнал “Цемент”. С 1885 по 1912 г. состоялось 14 съездов, посвященных проблемам нормирования качества цемента и бетонов, методам их испытания, изучению процессов их твердения и стойкости в агрессивных средах.

В XIX в. был предложен основной конструкционный материал нашего времени – железобетон. По влиянию на развитие мировой цивилизации изобретение железобетона можно поставить в один ряд с открытиями электричества или появлением авиации. Практическое применение этих открытий в странах Европы и Северной Америки началось примерно одновременно. Первоначально из армоцемента были изготовлены лодка (Ж. Ламбо, 1848 г.), садовые кадки (Ж. Монье, 1849 г.), а затем французский изобретатель Монье в 1867 г. получил патенты на изготовление железобетонных строительных изделий.

В 1861 г. выдающийся русский химик А.М. Бутлеров разработал теорию строения органических веществ, которая в значительной мере способствовала синтезу разнообразных полимерных материалов.

По мере развития химической науки, создания физической и коллоидной химии, физической химии силикатов, химии высокомолекулярных соединений была создана база для изучения процессов твердения вяжущих материалов, получения керамики и стекла, асфальтовых материалов и пластических масс.

В XX в. строительное материаловедение интенсивно развивалось на всех основных направлениях. Этому способствовало интенсивное развитие различных отраслей строительства и создание в странах с развитой экономикой мощной промышленности строительных материалов.

Создаются основы физической химии и петрографии различных оксидных и силикатных систем. Достигла значительных успехов наука о цементах и других вяжущих. Интенсивно развивается теория твердения вяжущих веществ и создан большой ряд вяжущих материалов различного назначения. Этому способствовали основополагающие работы А.А. Байкова, П.А. Ребиндера, В.Н. Юнга, П.П. Будникова, Ю.М. Бутта, В.В. Тимашева, и др.

Сформировалась как один из основных разделов строительного материаловедения наука о бетонах. Разработаны методы проектирования составов бетона, основы теории прочности и технологии бетона (Д. Абрамс, Ф. Мак-Милан, Т. Пауэрс, О. Граф, И. Боломей, Р. Лермит, Н.М. Беляев, С.А. Миронов, Н.А. Попов, Б.Г. Скрамтаев, И.Н. Ахвердов, Ю.М. Баженов и др.).

В трудах В.М. Москвина, В.И. Бабушкина, Г.И. Горчакова, Ф.М. Иванова, В.Б. Ратинова, С.В. Шестоперова и др. разработана общая фундаментальная теория коррозии бетона и железобетона.

Развитию строительной керамики в большой мере способствовали исследования П.А. Земятченского, А.И. Августинника, П.П. Будникова. Они разработали теоретические вопросы глиноведения, раскрыли процессы, происходящие при обжиге глин и другого керамического сырья.

Многочисленные химические и физико-химические исследования выполнены в области стекла, ситалов и многих других строительных материалов.

Изучение состава и структуры строительных материалов, фазовых превращений в материалах в процессе их получения и эксплуатации стало возможным благодаря широкому применению химических, физико-химических и физико-механических методов исследований. Благодаря основополагающим работам акад. П.А. Ребиндера и его научной школы развивается физико-химическая механика бетона и других



строительных материалов, позволяющая активно управлять их свойствами, изменяя их дисперсность, поверхностную активность, применяя добавки-модификаторы и т.п.

Третий этап развития строительного материаловедения охватывает период со второй половины XX в. до настоящего времени. В этот период созданы новые эффективные материалы, мощные технологические линии по производству основных строительных материалов, включающие высокопроизводительные обжиговые и помольные агрегаты, дробильное, смешивающее и другое оборудование, системы аспирации, пылеулавливания и др. Разрабатываются и внедряются автоматизированные системы управления технологическими процессами. С применением бетона, железобетонных конструкций, других строительных материалов возводятся уникальные гидротехнические, промышленные, транспортные сооружения.

На современном этапе строительное материаловедение, удовлетворяя запросы строительной практики, развивается с учетом необходимости обеспечения высокого качества материалов и изделий их надежности и долговечности при рациональном использовании природных ресурсов, энергосбережения, повышения экологической безопасности промышленного производства.

Для новых технологий обязательными признаками являются ресурсосбережение и экологическая безопасность при высоком уровне комплексной механизации и автоматизации производственных процессов. Перспективными направлениями развития технологии строительных материалов являются нанотехнологии.

Развитие строительного материаловедения тесно связано с развитием технологии фундаментальных и прикладных наук, позволяющих осмыслить и объяснить особенности структуры конкретных материалов, зависимости, связывающие ее с их свойствами. Все большее значение приобретают теоретические исследования, связанные с моделированием структуры материалов и на их основе разработки принципов направленного структурообразования, синтеза строительных материалов с заданными свойствами. Эффективными являются исследования с применением компьютерных технологий, направленные на оптимизацию свойств материалов и технологических режимов их производства. Особое технико-экономическое и экологическое значение имеют исследования возможности и эффективности применения в различных технологиях техногенного сырья и отходов промышленности.

# ЧАСТЬ I. ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

---

## 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К *строительным материалам* (от лат. *materia* – вещество) относят вещества и смеси веществ, имеющие свойства, позволяющие их использовать при строительстве зданий и сооружений. В строительстве применяют чрезвычайно большое количество материалов, которое интенсивно увеличивается с каждым годом. Функциональное соответствие материалов, их надежность, технологичность, экологическая безопасность обеспечиваются при достаточном соответствии определенных качественных показателей требованиям государственных стандартов, технических условий и других действующих нормативных документов.

### 1.1 Основные понятия и классификация строительных материалов

Свойства строительных материалов определяются их составом и структурой.

Состав материалов характеризуется содержанием отдельных химических соединений (*химический состав*), минералов (*минералогический состав*), частей или фаз однородных по химическому составу и физическим свойствам, ограниченных поверхностью раздела (*фазовый состав*) и количеством отдельных компонентов – веществ, образующих данный материал (*вещественный состав*).

Большинство строительных материалов относятся к гетерогенным *дисперсным системам*, состоящим из двух или более фаз. В дисперсных системах одно или несколько веществ (дисперсная фаза) являются частичками или порами, распределенными в окружающей дисперсной среде. Дисперсные системы разделяют на грубодисперсные и тонкодисперсные. Последние называют также коллоидными системами. В грубодисперсных системах частицы имеют размеры от 1 мкм и выше, их удельная поверхность не более 1 м<sup>2</sup>/г, в коллоидных от – 1 нм до 1 мкм, удельная поверхность может достигать сотен м<sup>2</sup>/г.

В строительных материалах, которые принадлежат к дисперсным системам, дисперсную фазу наиболее часто составляют твердые частички. Это разнообразные порошки, суспензии, пасты, пластично-вязкие смеси, вяжущие вещества, пластмассы, лакокрасочные соединения, керамические массы, растворы и бетонные смеси, расплавы стекловидных веществ и т.п. В некоторых материалах дисперсная фаза может быть жидкой (полимерные эмульсии) или газообразной (пористые горные породы, ячеистые бетоны, пено-стекло, пенопласты и т.п.).

*Структура* материалов характеризует особенности их строения в т.ч. размещения в пространстве отдельных фаз и компонентов, характер связей между ними.

Единой классификации строительных материалов не разработано, существует много классификационных признаков и между отдельными группами материалов существует сложная структура связей.

Классификационные признаки строительных материалов разделяют на физические, химические, физико-химические, механические, структурные, технологические и функциональные.

По происхождению строительные материалы разделяют на природные и искусственные. Природные материалы получают из природного сырья путем механической обработки без изменения их химического состава и структуры.

За исключением природных камней и древесины, строительные материалы – это искусственные продукты, в основе получения которых лежат химико-технологические процессы. Искусственные материалы по составу и свойствам могут существенно отличаться от природного сырья.

Распространенной является классификация строительных материалов по назначению. Н.А. Попов предложил разделять строительные материалы по назначению на две группы: материалы универсального типа, пригодные для несущих конструкций, и материалы специального назначения. В первую группу входят природные и искусственные каменные материалы, металлы, конструкционные пластмассы и лесные материалы, во вторую – теплоизоляционные, акустические, гидроизоляционные, кровельные, герметизирующие, отделочные, антикоррозионные и огнеупорные материалы.

*Материалы для несущих конструкций* подбирают с учетом особенностей конструктивных элементов и технико-экономических обоснований. С этой целью широко используют стальной и алюминиевый прокат, бетон и железобетон, кирпич, клееную древесину и т.п.

*Материалы для ограждающих конструкций* являются самонесущими и не подвергаются влиянию больших нагрузок. Наружные ограждающие конструкции могут воспринимать снежные и ветровые нагрузки, а также подвергаться агрессивному воздействию окружающей среды. Материалы, занимающие конструктивное пространство между несущими элементами, должны быть легкими и иметь низкую теплопроводность.

*Отделочные материалы* придают поверхностям конструкций зданий и сооружений защитные и декоративные свойства. Различают отделочные и отделочно-монтажные материалы. Первые применяют для устройства защитно-декоративных покрытий на поверхности конструкций (штукатурка, лаки, краски, обои), другие объединяют как отделочные, так и конструктивные функции при устройстве покрытий (стеклоблоки, профильное стекло, древесностружечные и древесноволокнистые плиты, асбестоцементные и алюминиевые изделия).

Функциональное назначение *теплоизоляционных материалов* состоит в уменьшении потерь теплоты при эксплуатации зданий и сооружений, а также тепловых агрегатов и трубопроводов. Конструкционно-теплоизоляционные материалы используют для самонесущих конструкций зданий и малоэтажных несущих конструкций (ячеистые бетоны, арболит, фибролит и т.п.).

К теплоизоляционным материалам по структуре близки *акустические материалы*, которые предназначены для снижения энергии звуковых колебаний (уровня шума). Их разделяют на звукопоглощающие и звукоизоляционные.

Для защиты строительных конструкций зданий и сооружений от воздействия воды и водных растворов агрессивных веществ применяют *гидроизоляционные материалы*. В зависимости от назначения такие материалы разделяют на антифильтрационные, антикоррозионные и герметизирующие.

Верхним водозащитным слоем в конструкции кровель является кровельное покрытие. Некоторые материалы (рулонные, мастики)

можно использовать как для кровель, так и для гидроизоляции, а другие (асбестоцементные листы, черепица, кровельная сталь) – только для кровель.

К строительным материалам относят также *санитарно-технические изделия* – ванны, раковины, мойки, приборы для отопления кухонь, оборудование санузлов.

К отдельной группе можно отнести *строительные материалы специального назначения* – дорожные, жаростойкие, кислотостойкие, электротехнические, трубопроводные и др.

Развернутая классификационная система для искусственных строительных материалов предложена И.А. Рыбьевым. В ее основу положено выделение трех типов материалов: 1) твердеющих при обычных температурах; 2) в условиях автоклавов, т.е. при повышенных температурах и давлений пара; 3) при остывании огненно-жидких расплавов, выполняющих функцию вяжущих веществ. В пределах каждого типа искусственные материалы группируют в зависимости от вида вяжущих веществ. В материалах безобжигового типа цементирующая часть представлена неорганическими, органическими и комплексными вяжущими, обжигового – керамическими, стеклянными, шлаковыми и др. расплавами. В материалах автоклавного типа типичными являются вяжущие преимущественно автоклавного твердения. Данная классификационная схема является, как отмечает и сам ее автор, неполной и условной, не всегда позволяющей провести четкую границу между отдельными типами и группами материалов.

В строительном материаловедении наибольшее распространение получила смешанная система классификации строительных материалов, в которой учитывается комплекс различных признаков – состав сырья и готовых продуктов, их структура и назначение.

Строительные материалы большей частью относятся к композиционным материалам (композитам). *Композиционными* называют естественные или искусственные гетерогенные материалы, общим признаком которых является наличие поверхности раздела между компонентами (фазами), которые их образуют. В композиционном строительном материале (КСМ) различают первую фазу, или матрицу – непрерывный связующий компонент, находящийся в твердом кристаллическом или аморфном состоянии, и вторую фазу –

## 1. Классификация и стандартизация строительных материалов

---

вещество или несколько веществ, диспергированных в матрице, которые могут находиться в любом агрегатном состоянии.

В качестве второй фазы КСМ служат тонкодисперсные порошкообразные или волокнистые материалы различной природы, являющиеся упрочняющими или армирующими компонентами. Порошкообразные или зернистые наполнители (заполнители), особенно часто вводимые в строительные композиты, улучшая ряд их свойств, способствуют также уменьшению расхода связующего компонента и удешевлению материалов.

Матрица обеспечивает монолитность композитов, фиксирует форму изделий, распределяет действующие напряжения по объему материала. Материал матрицы определяет метод изготовления изделий, возможность выполнения конструкций с заданными параметрами.

По назначению КСМ разделяют на силовые, несиловые и специальные. Силовые КСМ (стеклопластики, асбестоцемент, бетоны и др.) должны иметь соответствующие механические свойства, позволяющие воспринимать значительные нагрузки. К несиловым КСМ, не предназначенным для восприятия значительных нагрузок, относятся, например, теплоизоляционные материалы на основе разных волокон (фибrolит, минераловатные плиты и др.), пено- и газобетоны, пеностекло, пенопластики.

КСМ специального назначения могут работать в условиях высоких температур (жаростойкие, огнестойкие), химической агрессии (щелоче- и кислотостойкие), электрического напряжения (электроизоляционные, электропроводные). К ним относятся также звуко- и теплоизоляционные, декоративные, безусадочные, расширяющиеся и другие КСМ.

По материалу матрицы КСМ разделяют на цементные, гипсовые, керамические, металлические и др. Наполнители достаточно разнообразны. В табл. 1.1 приведены примеры КСМ с применением волокнистых и слоистых наполнителей, использованных в качестве упрочняющих компонентов. Армирование КСМ волокнами может быть как ориентированное (железобетон, стеклоцемент, стеклопластики), так и дисперсное (фибробетон).

Таблица 1.1

Примеры армированных КСМ

| Матрица                                                                     | Армирующий компонент                                                                                         | Строительный материал                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Стекланные и керамические материалы                                         |                                                                                                              |                                                                                                                   |
| Стекло                                                                      | металлическая сетка<br>полимерная пленка<br>кристаллические включения                                        | армированное стекло<br>триплекс<br>(многослойное стекло)<br>ситаллы, шлакоситаллы                                 |
| Обожженная глина                                                            | каолиновые, муллитовые, корундовые, углеродные волокна                                                       | огнеупорные и специальные керамические материалы                                                                  |
| Материалы на основе неорганических вяжущих веществ                          |                                                                                                              |                                                                                                                   |
| Неорганические гидравлические вяжущие вещества                              | стальная, базальтовая, полимерная фибра<br>металлическая арматура<br>асбест<br>древесное волокно и дробленка | фибробетоны<br>железобетон<br>асбестоцемент<br>арболит, фибролит                                                  |
| Гипсовые вяжущие вещества<br>магнезиальные вяжущие                          | картон<br>бумажная макулатура<br>древесная стружка<br>древесные опилки                                       | гипсокартонные листы<br>гипсоволокнистые листы<br>гипсостружечные плиты<br>ксилолит                               |
| Материалы на основе древесины                                               |                                                                                                              |                                                                                                                   |
| Полимерные вяжущие вещества                                                 | шпон<br>стружка<br>волокна                                                                                   | фанера, клееная древесина<br>древесностружечные плиты<br>древесноволокнистые плиты                                |
| Битумные, дегтевые и полимерные материалы                                   |                                                                                                              |                                                                                                                   |
| Битум и битумно-полимерные вяжущие вещества<br>деготь<br>полимерные вяжущие | картон, фольга, стекловолочно. асбест<br><br>картон<br>стеклянное волокно<br>тканые и нетканые материалы     | рубероид, фольгоизол, стеклорубероид, гидроизол<br><br>толь<br>стеклопластик<br>линолеум, ковровые покрытия и др. |

Особенно распространены КСМ с зернистыми наполнителями (бетоны, растворы, мастики). При малом содержании наполнителя (заполнителя) свойства КСМ определяются в основном свойствами

## 1. Классификация и стандартизация строительных материалов

---

матрицы, а в случае роста содержания наполнителя их свойства могут существенно изменяться, приобретая специфические признаки, которые свойственны только данному виду КСМ. Например, для цементных бетонов увеличение содержания наполнителя до определенного предела способствует увеличению прочности на 20-30%, асфальтовых – на 50-80%.

Разновидностью композиционных материалов являются *искусственные строительные конгломераты (ИСК)*. По И.А. Рыбеву искусственными строительными конгломератами называют материалы, в которых заполнитель цементируется вяжущими веществами или первичными связями (химическими, электрическими, металлическими и др.) в монолит. К естественным конгломератам относятся горные породы, к искусственным – прежде всего различные бетоны и растворы. В классификации ИСК предложено выделить два типа таких материалов – безобжиговые, которые образуются в результате низкотемпературных физико-химических процессов твердения вяжущих веществ, и обжиговые, образуемые при охлаждении из расплавов или контактном спекании.

*Сырьевыми компонентами* строительных материалов могут быть твердые, жидкие и газообразные вещества. Большая часть твердого сырья представлена горными породами, древесиной и промышленными отходами (шлаки, золы, отсеvy и т.д.). Жидкими сырьевыми материалами являются нефтепродукты, жидкие отходы химических предприятий, водные растворы. Перерабатывая нефть и каменный уголь, получают газообразные продукты, которые можно использовать для производства полимерных материалов.

Из неорганических сырьевых материалов наиболее распространены силикаты, преобладающие (66,5%) в составе земной коры. К минеральному сырью многоцелевого назначения относятся глина, карбонатные породы, пески, и др.

### 1.2. Стандартизация и оценка качества материалов

Основные требования к качеству материалов и изделий массового применения устанавливаются Государственными стандартами (ГОСТ), отраслевыми стандартами (ОСТ), стандартами предприятий (СТП), техническими условиями (ТУ). В этих нормативных документах могут содержаться термины и определения, краткое



описание материалов и способы их изготовления, требования к качеству, правила транспортирования, приемки и хранения, а также методы испытаний.

Наряду с национальными в российской системе стандартизации находят применение стандарты ИСО – Международной организации по стандартизации.

Указания о применении строительных материалов и требования к их свойствам приведены также в строительных нормах и правилах (СНиП), где регламентируются основные положения строительного проектирования и производства.

Нормативные требования к ведущим свойствам материалов, определяющим их применение, выражены в виде *марок* или *классов*. Марка вычисляется обычно как среднее арифметическое результатов испытаний определенного числа образцов, класс является численной характеристикой определенного свойства материала, принимаемой с гарантированной обеспеченностью, т.е. с учетом его возможного разброса, измеряемого статистическими показателями.

Методической основой стандартизации размеров при проектировании и изготовлении строительных изделий является Модульная координация размеров в строительстве (МКРС), позволяющая унифицировать число типоразмеров и обеспечить взаимозаменяемость изделий из разных материалов. Основной модуль (М) принимают равным 100 мм. Размеры объемно-планируемых параметров зданий и сооружений (ширину пролетов, шаг колоны, рам) и крупных строительных изделий (стеновых панелей, блоков, плит) назначают кратными укрупненным модулям (2 м, 3 м, 6 м, 12 м, 30 м, 60 м). Для назначения относительно малых размеров конструктивных элементов и деталей наряду с основным используют дробные модули, мм: 1 (1/100 м), 2 (1/50 м), 5 (1/20 м), 10 (1/10 м), 20 (1/5 м), 50 (1/2 м).

*Качество* материалов характеризует степень их соответствия требованиям потребителя. Используются разнообразные методы определения показателей качества: *инструментальный* – измерение свойств приборами; *органолептический* – оценка свойств анализом ощущений человека, сравнением исследуемых материалов с эталоном; *экспертный*, основанный на оценках опытных специалистов – экспертов; *социологический*, основанный на анализе оценок потребителей продукции; *расчетный* – расчет показателей качества

## 1. Классификация и стандартизация строительных материалов

---

в зависимости от параметров его состава и структуры с учетом особенностей технологического процесса.

Наиболее широко применяются инструментальные методы оценки качества материалов, имеющие сложившуюся научную базу. Инструментальные методы базируются на *метрологии* – науке об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Результаты всех измерений содержат погрешности, вызванные несовершенством приборов и методов, непостоянством условий наблюдений, недостаточным опытом наблюдателя или особенностями его органов чувств. *Систематические погрешности* в процессе последовательных измерений остаются постоянными (рис. 1.1) или изменяются по определенному закону. Например, при определении марки цемента систематическую ошибку вносит использование пластинок с шероховатой поверхностью. Такую ошибку можно устранить путем подшлифовки и дополнительной закалки пластинок. Систематические погрешности в случае невозможности их устранения могут быть изучены и учтены в виде поправок. В отличие от систематических *случайные погрешности* при повторных измерениях одной и той же величины принимают различные значения. Их нельзя исключить из результатов измерений, их изучают и учитывают, обрабатывая результаты повторных опытов с использованием математической статистики и теории вероятности.

Погрешности, значительно превышающие объективно допустимые (промахи), возникают по ряду причин и оцениваются с помощью статистических критериев.

Значения измеряемых величин в зависимости от способа получения делят на четыре вида: прямые, косвенные, совместные и совокупные.

*Прямые* измерения заключаются в экспериментальном сравнении измеряемой величины с ее мерой или в отсчете показаний прибора, дающего значение измеряемой величины

*Косвенные* измерения получают на основе прямых, связанных с измеряемой величиной известными зависимостями (плотность – масса единицы объема, предел прочности – отношение разрушающего усилия к площади поперечного сечения образца и т.д.).

*Совместными* называют одновременно производимые измерения двух или нескольких неоднородных величин для нахождения

зависимости между ними. При этом значения измеряемых величин находят по данным повторных прямых или косвенных измерений. Так, для определения модуля упругости бетона измеряют напряжения в бетоне при различных значениях относительной деформации ( $\epsilon$ ). При напряжении, например, равном 0,2 предела прочности  $R$  начальный модуль упругости вычисляют по формуле:

$$E_H = 0,2R / \epsilon. \quad (1.1)$$

При определении температурного расширения также надо выполнить совместные измерения температуры  $t$  и рассчитать соответствующие значения относительного удлинения  $\epsilon_t$ . Для расчета  $\epsilon_t$  необходимо с помощью системы уравнений рассчитать коэффициенты в формуле:

$$\epsilon_t = at + bt^2 + \dots \quad (1.2)$$

В отличие от совместных *совокупные* измерения проводятся для нескольких одноименных величин.



**Рис. 1.1.** Пример погрешностей измерений:  
а – систематическая; б – случайная

Для промышленной продукции методы и средства измерений всех основных свойств, характеризующих качество изделий, стандартизуются. Применительно к строительным материалам стандартизованы методы и средства измерений параметров состояния и характеристики структуры, физических, механических и химических свойств.

*Уровень качества продукции* оценивается системой показателей назначения, надежности и долговечности, технологичности, эргономики, стандартизации и унификации, экономичности и др.

*Показатели назначения* характеризуют полезный эффект от использования материалов по назначению и область их применения. К ним относятся преимущественно технические свойства материалов, показатели их состава и структуры, транспортабельность и т.д.

*Показатели надежности* характеризуют стабильность свойств материалов в заданных границах, обеспечивающих их нормальную эксплуатацию (работоспособность).

Состояние, при котором материал полностью или частично утрачивает работоспособность, называют *отказом*. Под безотказностью понимают способность материалов сохранять работоспособность при определенных условиях в течение определенного времени без ремонта. Способность материалов сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами на ремонт характеризуется *долговечностью*. Долговечность измеряют сроком службы материалов. На практике часто понятия надежности и долговечности отождествляют.

*Показатели технологичности* характеризуют способность материалов перерабатываться в изделия и конструкции. К таким показателям принадлежат формуемость, свариваемость и др.

*Эргономические показатели* качества объединяют гигиеничность, антропометрические, психологические и ряд других показателей в системе “человек-среда-изделие”.

*Технико-экономические показатели* характеризуют затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию материалов. К ним относятся также материалоемкость продукции, которая определяется отношением количества или стоимости затраченных на ее производство материальных ресурсов к объему, энерго-, трудо-, металлоемкость и др.

Классификация показателей качества условна: один и тот же показатель может принадлежать к разным группам и подгруппам. По совокупности показателей определяют сорта, классы, группы, марки и другие качественные градации материалов.

При оценке уровня качества материалов используют дифференцированный, комплексный и смешанный методы. При *дифференцированном* методе показатели качества материалов сравнивают с базовыми показателями, приведенными в стандартах. Например, если при требуемой (базовой) средней прочности бетона 20 МПа удалось обеспечить (без перерасхода ресурсов) прочность 25 МПа,

то уровень качества бетона по прочности  $25/20=1,25$ . Аналогично рассчитывают и относительные показатели качества по другим нормированным свойствам.

Если уровень качества необходимо охарактеризовать одним обобщенным показателем, применяют *комплексный* метод. В этом случае используют интегральные показатели качества, например, полезный эффект (Э) на 1 руб. затрат:

$$\text{Э} = \text{П}_\Sigma / (\text{З}_\text{п} + \text{З}_\text{и}), \quad (1.3)$$

где  $\text{П}_\Sigma$  – суммарный полезный эффект, руб.;  $\text{З}_\text{п}$  – затраты на получение материала, руб.;  $\text{З}_\text{и}$  – затраты на использование материала, руб.

Если можно установить коэффициент значимости  $m_i$  для каждого отдельного показателя  $q_i$  в системе показателей, то комплексную оценку можно выполнить методом определения *средневзвешенного интегрального* показателя  $Q$ :

$$Q = \sum_{i=1}^n m_i q_i, \quad (1.4)$$

где  $q_i = P_i/P_{i,б}$  – относительный показатель качества по  $i$ -му признаку;  $P_i$  – показатель качества для данного материала;  $P_{i,б}$  – базовый (эталонный) показатель качества.

### 1.3. Строительные материалы как стохастические объекты

Современные строительные материалы – сложные гетерогенные системы, характеризующиеся множеством как внутренних, так и внешних связей на микро- и макроуровнях, формирующих их структуру и свойства.

В зависимости от степени неопределенности все связи можно разделить на детерминированные и вероятностные или стохастические. Первые являются строго обусловленными и предсказуемыми. Например, зная плотность вещества, из которого состоит материал (истинная плотность) и плотность материала (средняя плотность), можно точно рассчитать его общую пористость, зная количество шарообразных зерен и распределение их по диаметрам, можно определить удельную поверхность смеси.

Вместе с тем большинство связей и, как следствие, качественных показателей материалов являются *стохастическими*, т.е. характеризуются с определенной вероятностью, и соответственно, имею-

## 1. Классификация и стандартизация строительных материалов

---

щими некоторую неопределенность. К наиболее характерным стохастическим связям можно отнести связи между параметрами состава или структуры материала и их свойствами, параметрами воздействия внешней среды и реакциями материалов на них. Стохастичность таких связей обусловлена:

- неоднородностями и дефектами структуры материалов, начиная от атомно-молекулярного уровня слагающих их веществ, до макроуровня, характеризуемого пространственным расположением и взаимодействием основных фаз;

- сложным, часто разнонаправленным влиянием многих факторов, их изменчивостью, процессами “жизнедеятельности” материала во времени (тепло- и массообмен, физико-химические изменения, деградация).

Поведение всех стохастических систем, в том числе и строительных материалов на всех этапах их технологии и эксплуатации можно прогнозировать в заданных условиях с некоторой вероятностью в соответствии с закономерностями, имеющими статистический характер. По мере углубления теоретических представлений о механизмах структурообразования и “синтезе свойств” материалов, закономерностях их функционирования в конкретной среде точность и надежность предсказаний, связанных с поведением материалов, увеличивается, хотя вероятностный их характер остается. Стохастические закономерности в определенных физических и химических системах служат базисом для разработки новых материалов с заданными свойствами.

Вероятностный характер основных оценок и выводов при исследовании строительных материалов обуславливает необходимость широкого использования методологии статистического анализа. Она включает экспериментальное определение закона распределения изучаемого параметра, необходимое для выбора статистического метода решения задачи, расчет числовых характеристик распределения, установку их доверительных границ.

При экспериментальном определении свойств строительных материалов кривые распределения приближаются по характеру, как правило, к нормальной кривой Гаусса (рис. 1.2), которая соответствует равной вероятности появления как положительных, так и отрицательных отклонений от центра. Для характеристики определенной выборки эксперимента, включающей  $n$  наблюдений, используют средние величины – среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонение.

*Среднее арифметическое:*

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1.5)$$

где  $\sum_{i=1}^n x_i$  – сумма измеренных величин;  $n$  – число наблюдений.

*Среднее квадратическое отклонение* (стандарт) показывает пределы изменчивости изучаемого параметра, т.е. степень разброса отдельных его значений относительно среднего:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (1.6)$$

Среднее квадратическое отклонение является квадратным корнем *дисперсии*  $\sigma$ .

Если дисперсия и среднее квадратическое отклонение характеризуют абсолютную изменчивость свойства, то для выражения относительной изменчивости служит *коэффициент вариации*:

$$\varepsilon_v = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100 \%. \quad (1.7)$$

Этот коэффициент широко используется в технологии строительных материалов, характеризуя уровень технологической дисциплины при выпуске продукции, надежность контролируемых параметров.

Для того чтобы по среднему арифметическому данной ограниченной выборки судить более точно о средней величине измеряемого свойства, находят *среднюю ошибку* среднего арифметического:

$$m = \pm \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (1.8)$$

Отношение величины средней ошибки к величине среднего арифметического называется *показателем точности*:

$$\varepsilon = \pm \frac{m}{\bar{x}} \cdot 100 \%. \quad (1.9)$$

Статистическая обработка результатов испытания, кроме определения изменчивости измеряемого показателя качества и точности исследования, предполагает оценку *доверительной вероятности*  $I - p$  или *уровня значимости*  $p$  полученного результата.

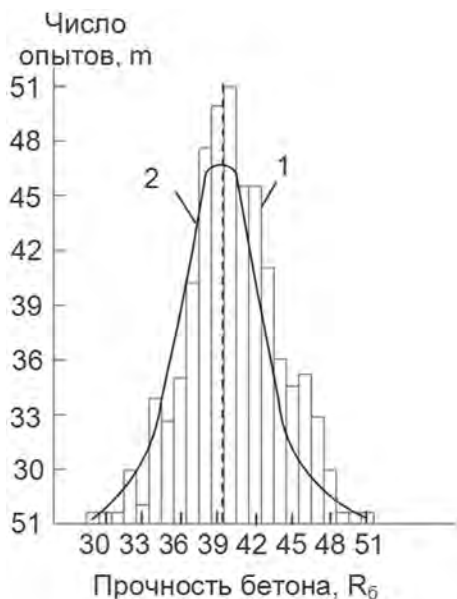


**Рис. 1.2.** Гистограмма (1) и кривая нормального распределения (2)

Уровнем значимости называют количество (или процент) таких маловероятных случаев, в которых исследователь рискует ошибиться, признав полученный результат правильным. Количество или процент достоверных (не вызывающих сомнений) значений изучаемого свойства называют доверительной вероятностью. Обычно в исследовательской практике изучения строительных материалов принимают два порога доверительной вероятности: 0,95; 0,99 и соответствующие им уровни значимости: 0,05 (5%) и 0,01 (1%). Величина доверительной вероятности или уровень значимости устанавливается в зависимости от степени точности, с какой проводится исследование, и ответственности выводов, вытекающих из него.

Число наблюдений, необходимых для получения достаточно надежных и достоверных результатов:

$$n = \frac{c_v^2 t^2}{\varepsilon^2}, \quad (1.10)$$

где  $t$  – критерий Стьюдента, который находится при соответствующих доверительной вероятности и числе степеней свободы по справочным данным.

К актуальным в строительном материаловедении задачам, решаемым с применением статистических методов, можно отнести определение объема экспериментальных данных, необходимых для репрезентативных оценок, сравнение результатов нескольких групп испытаний, определение метрологических характеристик экспериментов и др.



## 2. СТРУКТУРА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Под *структурой* материалов понимают их строение, которое определяется взаимным расположением, формой и размерами структурных элементов. Структурными элементами могут быть атомы, ионы, молекулы, твердые частицы (зерна) разной дисперсности, агрегаты частиц, поры, пустоты между частицами, заполненные жидкой или газообразной фазой.

Структуру материалов, ее общие признаки и особенности можно рассматривать на разных уровнях в зависимости от размеров структурных элементов (I). Выделяют четыре уровня структуры строительных материалов:

|                     |                                      |
|---------------------|--------------------------------------|
| атомно-молекулярный | $(l < 10^{-9} \text{ м});$           |
| наноструктурный     | $(l = 10^{-9} - 10^{-7} \text{ м});$ |
| микроскопический    | $(l = 10^{-7} - 10^{-4} \text{ м});$ |
| макроскопический    | $(l > 10^{-4} \text{ м}).$           |

### 2.1. Атомно-молекулярная структура материалов

Большинство строительных материалов относятся к твердым телам, которые могут иметь кристаллическое или аморфное строение. Кристаллические материалы в отличие от аморфных характеризуются упорядоченным расположением частиц в пространстве, образующих кристаллическую решетку.

Рассматривая структуру материала на атомно-молекулярном уровне изучают: для кристаллических материалов – особенности строения элементарных ячеек, а для аморфных – особенности агрегатов молекул, атомов или ионов, не образующих упорядоченных решеток.

К *кристаллическим* материалам относится большая группа естественных или искусственных материалов, имеющих преимущественно полиминеральный состав. Ряд материалов (например, цементы, полимеры, шлаки) содержат как кристаллические, так и аморфные компоненты.

Кристаллическое состояние тела является наиболее устойчивым, поскольку энергия материала при этом минимальная. Энергию кристаллической решетки сложных по составу веществ можно оценить,

## 2. Структура строительных материалов

представляя их химическую формулу в виде нейтральных групп и рассчитав энергию каждой группы отдельно. Например, представив химическую формулу минерала анортита  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ , входящего в доменные шлаки и другие материалы в виде  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , энергию его кристаллической решетки ( $U$ ) можно вычислить как сумму энергий более простых веществ:

$$U = U_{\text{CaO}} + U_{\text{Al}_2\text{O}_3} + U_{2\text{SiO}_2}.$$

Энергия ионной кристаллической решетки по А.Е. Ферсману равна сумме энергий отдельных ионов, которые ее составляют. Энергетическую характеристику, или константу ионов (ЭК) определяют по формуле:

$$\text{ЭК} = \frac{W_u^2}{2l_{\text{и}}}, \quad (2.1)$$

где  $W_u$  – валентность иона;  $l_{\text{и}}$  – расстояние между центрами ионов.

Ниже приведены значения ЭК для некоторых ионов:

| Ион              | ЭК   | Ион              | ЭК   | Ион                 | ЭК   |
|------------------|------|------------------|------|---------------------|------|
| $\text{Ba}^{2+}$ | 1,35 | $\text{Al}^{3+}$ | 4,85 | $\text{OH}^-$       | 0,37 |
| $\text{Ca}^{2+}$ | 1,75 | $\text{Fe}^{3+}$ | 5,15 | $\text{CrO}_4^{2-}$ | 0,75 |
| $\text{Fe}^{2+}$ | 2,12 | $\text{Ti}^{3+}$ | 8,40 | $\text{O}^{2-}$     | 1,55 |
| $\text{Mg}^{2+}$ | 2,10 | $\text{Si}^{3+}$ | 8,60 | $\text{SiO}_4^{4-}$ | 2,75 |
| $\text{Cr}^{2+}$ | 4,75 | $\text{H}^+$     | 0,32 |                     |      |

Суммарную энергию кристаллической решетки  $U$ , не содержащей сильно поляризующих или поляризованных ионов, можно выразить формулой А.Ф. Капустинского:

$$U = 256,1 \frac{\sum_n W_k W_a}{l_k + l_a}, \quad (2.2)$$

где  $n$  – количество ионов;  $W_k, W_a$  – валентности соответственно катионов и анионов;  $l_k, l_a$  – расстояния между центрами ионов.

Элементарные ячейки кристаллов разделяют на примитивные и сложные. В примитивных ячейках атомы или ионы размещены в вершинах элементарного параллелепипеда. Примитивные элементарные ячейки в зависимости от длины кристаллографических осей и величины углов между ними разделяют на семь типов (табл. 2.1, рис. 2.1).

В сложных элементарных ячейках на середине ребер или граней размещены дополнительные ионы (атомы).

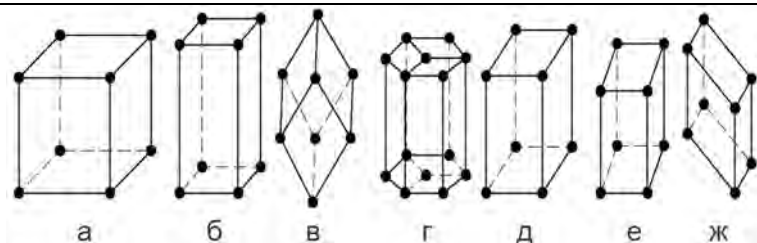


**Рис. 2.1.** Формы элементарных примитивных ячеек кристаллов:  
а – кубическая; б – тетрагональная; в – тригональная  
(ромбоэдрическая); г – гексагональная; д – ромбическая;  
е – моноклинная; ж – триклинная

Теорию построения пространственных решеток кристаллов основал Е.С. Федоров в 1890 г. Он установил 230 вариантов комбинаций в пространстве элементов симметрии пространственных решеток или пространственных групп.

Таблица 2.1

Типы примитивных элементарных ячеек

| Тип решетки     | Угол между осями                               | Соотношение размеров осей |
|-----------------|------------------------------------------------|---------------------------|
| Триклинная      | $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$  | $a \neq b \neq c$         |
| Моноклинная     | $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$        | $a \neq b \neq c$         |
| Ромбическая     | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$           | $a \neq b \neq c$         |
| Кубическая      | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$           | $a = b = c$               |
| Ромбоэдрическая | $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$        | $a = b \neq c$            |
| Гексагональная  | $\alpha = \beta = 90^\circ \gamma = 120^\circ$ | $a = b \neq c$            |
| Тетрагональная  | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$           | $a = b \neq c$            |

Минералы, которые входят в состав строительных материалов, образуют определенные типы кристаллических решеток, установление параметров которых – один из главных путей их идентификации. Ниже, в качестве примера, приведены типы кристаллических решеток минералов цементного клинкера:

Минерал

Трехкальциевый силикат

$\beta$ -двухкальциевый силикат

Решетка

Триклинная

Ромбическая

Трехкальцевый алюминат  
Четырехкальцевый алюмоферрит  
Двухкальцевый феррит

Кубическая  
Ромбическая  
Моноклинная

Большинство минералов образует одну из высокосимметричных решеток с плотной упаковкой атомов: кубическую объемно-центрированную, кубическую гранецентрированную и гексагональную (рис. 2.2). Расстояния  $a$ ,  $b$ ,  $c$  между центрами соседних атомов в элементарной ячейке называются периодами решетки и измеряются в нанометрах ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ).

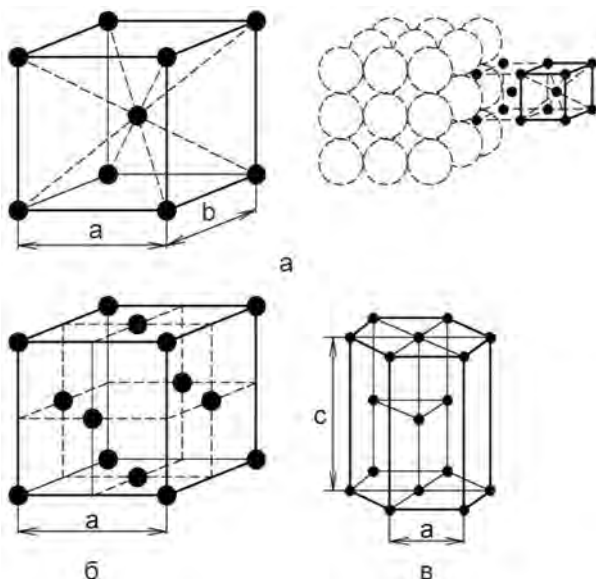


**Рис. 2.2.** Кристаллические решетки металлов:

а – объемно-центрированная кубическая;  
б – гранецентрированная кубическая; в – гексагональная

Плотность кристаллической решетки характеризуется *координационным числом  $K$* , под которым понимают количество атомов, ближайшее к данному атому (рис. 2.3). Например, в элементарной ячейке объемноцентрированной кубической решетки наименьшее расстояние между атомами  $l_a = 0,5/3$ . На этом расстоянии от данно-

го атома находится восемь других. Координационное число такой решетки составляет 8.

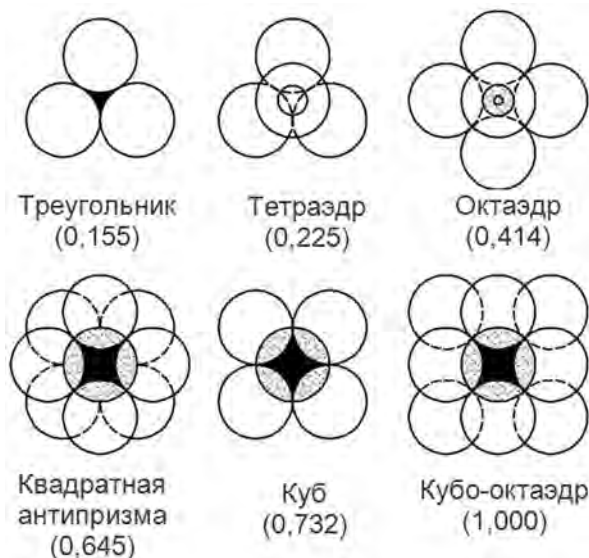


**Рис. 2.3.** Некоторые группировки анионов вокруг катиона (для каждого случая указано минимальное соотношение радиусов катион:анион)

Наиболее плотные решетки – гексагонального и гранецентрированного типа с координационным числом 12, коэффициентом компактности 74% (отношение объема атомов к объему ячейки).

Половину наименьшего расстояния между атомами или ионами в кристаллической решетке называют *атомным (ионным) радиусом*. С возрастанием координационного числа атомный радиус уменьшается, поскольку увеличивается расстояние между атомами.

Если в кристаллической решетке есть атомы (ионы) разных элементов, то отношение их координационных чисел равно обратному отношению числа элементов в химической формуле вещества. Например, решетка  $\text{SiO}_2$  имеет координационные числа 4 для  $\text{Si}^{4+}$  и 2 для  $\text{O}^{2-}$ . Отношение этих чисел составляет 2:1, то есть равно обратному отношению числа элементов. Наиболее устойчивое состояние кристаллической структуры вещества достигается, если катион контактирует со всеми анионами, которые его

## 2. Структура строительных материалов

---

окружают. В других случаях элементы решетки перегруппировываются, образуя нестабильную структуру с уменьшенным координационным числом.

Нестабильные структуры с низким координационным числом имеют большую химическую активность. Например, в метакеолине, получаемом в процессе обезвоживания каолинита – глинистого минерала, координация иона  $Al^{3+}$  составляет 4, а у исходного каолинита – 6. В отличие от каолинита метакеолин может химически взаимодействовать как в процессе автоклавной обработки, так и в нормальных условиях с гидроксидами кальция и магния.

Структуры кристаллов по характеристикам межатомных расстояний разделяют на пять классов: координационные, островные, цепочечные, слоистые и каркасные.

В *координационных* структурах, которые характерны для оксидов, солей и т.п., расстояние между структурными единицами (атомами, ионами) одного порядка. В *островных* структурах есть группы отдельных атомов, которые образуют “острова” (кальцит, пирит, большинство органических соединений). В *цепочечных* структурах выделяют отдельные группы атомов, которые образуют сплошные цепи (воластонит  $CaSiO_3$ , диопсид  $CaMgSi_2O_6$  и т.п.). *Слоистые* структуры имеют неоконченные в двух измерениях слои атомов (графит, тальк и т.п.). *Каркасные* структуры состоят из объемного трехмерного анионного остова координационного типа и нейтрализующей “начинки” из катионов или атомных групп. Примером такой структуры является ортоклаз  $KAlSi_3O_8$ .

Из-за неодинаковой плотности ионов или атомов в разных плоскостях и направлениях свойства кристаллов в зависимости от направления неодинаковы. Эта особенность кристаллических тел называется *анизотропией*. Она не характерна для аморфных тел (стекло, полимеры и т.п.). Выраженная анизотропия проявляется в цепочечных и слоистых структурах.

Строительные материалы минерального происхождения и металлы большей частью находятся в состоянии поликристаллов, в состав которых входит значительное количество нечетко ориентированных кристаллов, что уменьшает анизотропию. Некоторые способы обработки могут сопровождаться пространственной ориентацией кристаллов и служить причиной анизотропии свойств материалов.

Между структурными элементами кристаллов возможны ионная, атомная (ковалентная), металлическая (рис. 2.4), молекулярная и водородная связи.

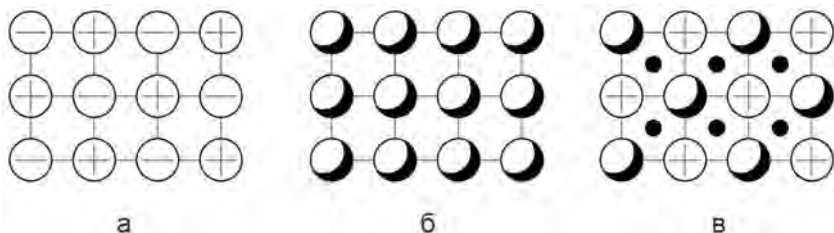


**Рис. 2.4.** Схемы кристаллических решеток:  
а – ионной; б – атомной; в – металлической

*Ионная связь* характерна для кристаллов, которые значительно отличаются по электроотрицательности их структурных элементов.

Большинство катионов имеет меньший размер, чем анионы, и кристаллическая решетка ионных соединений образуется за счет размещения катионов в пустотах между анионами. Характерные свойства ионных кристаллов – низкая электропроводность, теплопроводность, хрупкость и высокая температура плавления.

В узлах *атомных* кристаллических решеток помещаются нейтральные атомы, объединенные ковалентной связью. Эти связи довольно крепкие. Вещества, которые имеют такие решетки, твердые, тугоплавкие и практически нерастворимые (алмаз, кремний, соединения некоторых элементов с углеродом и кремнием – карбиды и силициды). Ковалентные кристаллы получаются из атомов, имеющих близкие значения электроотрицательности. Если увеличивается разность в электроотрицательности элементов, то возрастает степень перехода ковалентной связи в ионную.

По Полингу, например, связь Si-O на 50% ионная и на 50% ковалентная. Кислородным соединениям кремния, в состав которых входит силоксановая связь (Si-O), принадлежит ведущее место в номенклатуре современных строительных материалов. Наиболее распространенным и стойким соединением кремния является кремнезем  $\text{SiO}_2$ , который встречается в природе преимущественно в кристаллической форме. По современным представлениям кремнезем состоит из тетраэдров  $[\text{SiO}_4]^{-4}$ , связанных вершинами в отдельные комплексы так, что каждый атом кислорода является общим

## 2. Структура строительных материалов

для двух соседних тетраэдров и в свою очередь связан с двумя атомами кремния (рис. 2.5). Кремнийкислородный тетраэдр – основная структурная единица всех естественных и искусственных силикатов. Комплексы кремнийкислородных тетраэдров образуют замкнутые кольца или бесконечные цепи. Объединение цепей создает бесконечные ленты (рис. 2.6), которые в свою очередь могут создавать слои. Примерами слоистых силикатов являются тальк, слюда, каолинит. Часть ионов  $\text{Si}^{4+}$  может замещаться ионами  $\text{Al}^{3+}$ . Если координационное число ионов  $\text{Al}^{3+}$  составляет 4, то получаются алюмосиликаты с тетраэдром  $[\text{AlO}_4]^{-5}$ , а если 6, то с октаэдром  $[\text{AlO}_6]^{-9}$ . Для силикатов характерны химические связи промежуточного типа – ионно-ковалентные. Кристаллы с преобладающим количеством ковалентных связей имеют повышенную твердость по сравнению с кристаллами с преобладанием ионных связей.

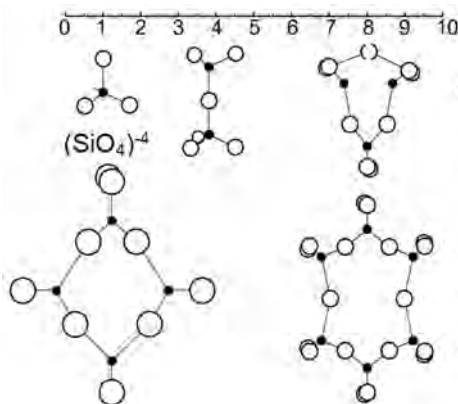


**Рис. 2.5.** Формы изолированных кремнийкислородных группировок

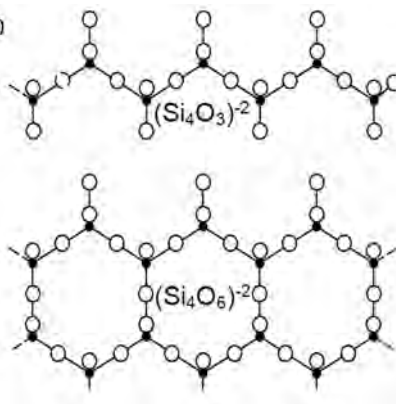


**Рис. 2.6.** Формы кремнийкислородных цепочек и лент

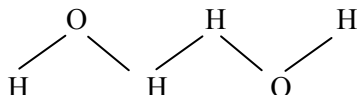
В *металлических* кристаллах определяющая роль принадлежит электронам. Они свободно перемещаются между атомами. В узлах таких кристаллов колеблются положительные ионы металла, а валентные электроны могут передвигаться через решетку в разных направлениях. Совокупность свободных электронов иногда называется электронным газом. Такое строение решетки предопределяет высокие тепло- и электропроводность и пластические свойства металлов. Механическое деформирование кристаллической решетки в



определенных пределах не вызывает разрушения кристаллов, поскольку ионы, которые входят в их состав, будто плавают в облаке электронного газа.

В узлах *молекулярных* кристаллических решеток размещены группы атомов или молекулы, связанные между собою Ван-дер-Ваальсовскими силами и дипольными взаимодействиями. Силы Ван-дер-Ваальса возрастают в случаях, если увеличивается количество атомов в молекуле и их полярность. Молекулярные силы сравнительно слабые, поэтому молекулярные кристаллы, характерные для ряда органических веществ, легкоплавкие, летучие и имеют низкую твердость. Например, кристаллы парафина с молекулярной решеткой очень мягкие, хотя ковалентные связи С–С между атомами углеводородных молекул довольно прочные.

Распространенный тип связи в кристаллах неорганических веществ – связь через ион водорода, который размещен между двумя анионами и крепко связывает их. Образование *водородной* связи, имеет большое значение в структурах воды и многих других соединений, в состав которых входят водород и кислород. Образованием водородной связи объясняется наличие в воде ассоциированных молекул  $(\text{H}_2\text{O})_n$ . Наибольшую стойкость имеют удвоенные молекулы  $(\text{H}_2\text{O})_2$ , образование которых сопровождается возникновением двух водородных связей:



По полимеризационной теории молекулы воды могут существовать в формах гидроля  $\text{H}_2\text{O}$  (рис. 2.7, а), дигидроля  $(\text{H}_2\text{O})_2$ , а также тригидроля  $(\text{H}_2\text{O})_3$ .

Лед (рис. 2.7, б) состоит преимущественно из молекул тригидроля, которые характеризуются наибольшим объемом пустот и поэтому наименьшей для воды плотностью, а водяные пары – из молекул гидроля.

Водородной связью в значительной мере объясняются аномальные свойства воды: высокая диэлектрическая постоянная, поверхностное натяжение, способность к смачиванию и растворению многих веществ. Возникновение водородной связи обусловлено тем, что атом водорода, отдавая свой единственный электрон на образование ковалентной связи с кислородом и, оставаясь ядром относи-

## 2. Структура строительных материалов

тельно маленьких размеров с довольно сильным электрическим полем, активно взаимодействует с электронными оболочками атомов кислорода в молекулах других веществ. Водородные связи определяют полимеризацию некоторых органических кислот и способствуют образованию многих неорганических полимеров. Возникновение водородной связи частично предопределяет гидратацию полярных групп, а также гидрофильность соответствующих поверхностей материалов.

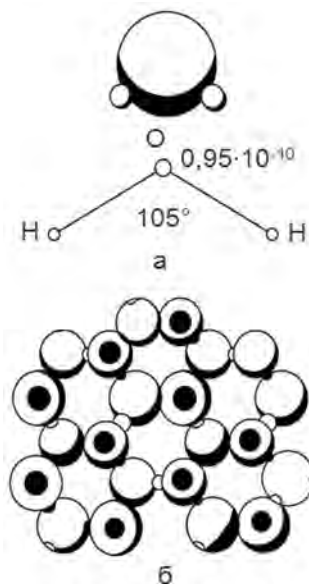


**Рис. 2.7.** Структура молекулы:  
а – воды; б – льда

Энергия ковалентной, ионной и металлической связи составляет 126-420 кДж/моль, молекулярной – не превышает 42 кДж/моль, водородной – 8,4-42 кДж/моль.

В большинстве кристаллов одновременно действует несколько типов связей, с учетом характера которых оценивают их теоретическую прочность и другие свойства.

В реальных материалах всегда имеются различные дефекты кристаллической решетки. По геометрическим признакам их разделяют на точечные, линейные, поверхностные и объемные. *Точечные дефекты* (рис. 2.8) могут быть обусловлены тепловыми колебаниями в узлах, влиянием радиации и электромагнитных волн (энергетические дефекты), изменениями в распределении электронов на энергетических уровнях (электронные дефекты), смещением

атомов от среднего положения, наличием примесных атомов, занятых узлов-вакансий (атомные дефекты).

Наибольшее значение из точечных дефектов имеют атомные, повышающие подвижность атомов (ионов) в кристаллической решетке и, как следствие, увеличивающие диффузную проницаемость и ионную проводимость кристаллов. Если вещество кристаллизуется из раствора или расплава при наличии посторонних атомов, то эти атомы могут войти в решетку основного соединения и образовать

*твердые растворы*. Посторонние атомы проникают к решетке основного кристалла двумя путями (рис. 2.9):

- 1) занимают узловые точки кристаллической решетки, замещая частички основного компонента (твердые растворы замещения);
- 2) размещаются в междузлиях кристаллической решетки (твердые растворы внедрения).

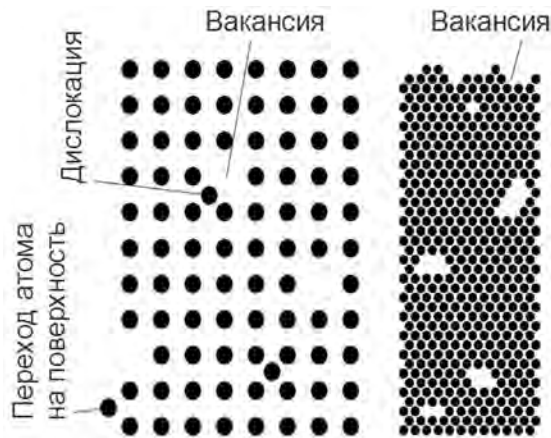


**Рис. 2.8.** Точечные дефекты кристаллической решетки

Способность атомов, ионов или молекул замещать друг друга в кристаллических структурах и создавать при этом однородные фазы переменного состава называют *изоморфизмом*. Изоморфизм наблюдается, если атомы имеют одинаковые координационные числа, а также при близких размерах взаимозамещаемых ионов, одинаковом строении их элект-

ронных оболочек. Так, радиусы ионов натрия и кальция составляют соответственно  $0,98 \cdot 10^{-10}$  и  $1,04 \cdot 10^{-10}$  м, поэтому натриевый и кальциевый шпаты (альбит и анортит) образуют непрерывный ряд твердых растворов замещения (плаггиоклазы). Например, плаггиоклаз, в составе которого 50-70% анортита, называется лабрадором. Он образует горную породу лабрадорит, которая широко используется как облицовочный материал.

Радиусы ионов натрия и калия отличаются более чем на 15% ( $0,98 \cdot 10^{-10}$  м и  $1,33 \cdot 10^{-10}$  м), поэтому натриевый и калиевый шпаты образуют твердые растворы лишь в условиях высоких температур, при нормальной температуре они распадаются.

Образование твердых растворов замещения (рис. 2.9, а) характерно при получении многих керамических материалов, цементного клинкера и т.п.

## 2. Структура строительных материалов

Твердые растворы внедрения (рис.2.9, б) характеризуются переменным составом. Как правило, через междоузлия способны проникать атомы и ионы небольших размеров или соизмеримые с пустотами кристаллической решетке. Наиболее часто растворы внедрения характерны для металлических материалов.

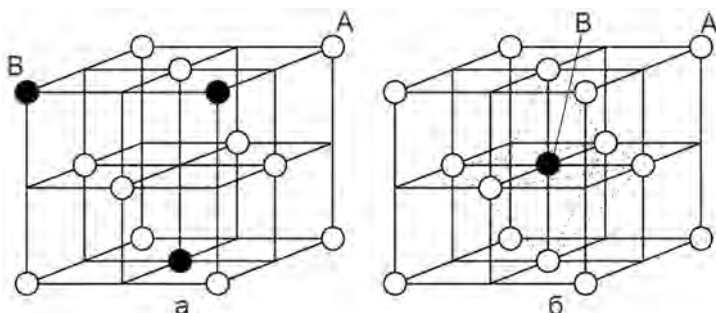


**Рис. 2.9.** Кристаллическая решетка твердого раствора:  
а – замещения; б – внедрения

Наряду с твердыми растворами замещения и внедрения существуют твердые растворы вычитания, которые характеризуются незаполненными структурными позициями. Примером таких растворов является система, образованная нефелином  $\text{Na}[\text{AlSiO}_4]$  и кварцем  $\text{SiO}_2$ . В кристаллической структуре твердого раствора остаются пустоты, не заполненные  $\text{Na}^+$ .

Характер образования твердых растворов зависит от условий кристаллизации. Например, в процессе синтеза алита – основного минерала цементного клинкера в условиях равновесия ионы  $\text{Ca}^{2+}$  могут замещаться двумя процентами ионов  $\text{Mg}^{2+}$ , а в неравновесных условиях наряду с этими процессами часть ионов  $\text{Mg}^{2+}$  проникает в пустоты решетки трехкальциевого силиката  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , что сопровождается его распадом на  $\text{CaO}$  и  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ .

Основными видами *линейных дефектов* кристаллов являются *дислокации*, вдоль и вблизи которых нарушается порядок в расположении атомных плоскостей. Различают краевые и винтовые дислокации (рис. 2.10). Краевая дислокация – локализованное искажение кристаллической решетки, вызванное наличием в ней “лишней” атомной полуплоскости (экстраплоскости). Винтовая дислокация – линия, образованная атомными плоскостями в виде

винтовой поверхности. Дислокация образуется вследствие сдвига частей кристалла вдоль плоскости скольжения, параллельной одной из плоскостей кристаллической решетки. Дислокация является краевой, если она параллельна направлению скольжения.

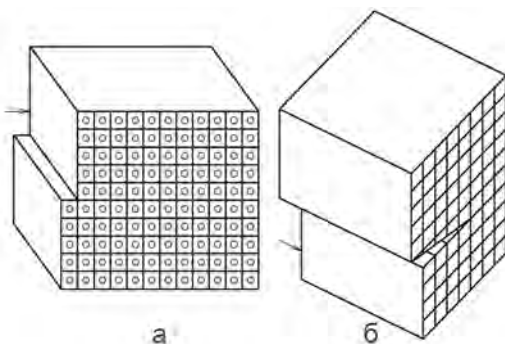


**Рис. 2.10.** Дислокации, образовавшиеся при пластической деформации кристалла:  
а – краевые; б – винтовые

Дислокации характеризует *вектор Бюргерса*, являющийся единицей расстояния сдвига и параллельный направлению скольжения. Его определяют, подсчитывая количество межатомных расстояний по контуру дислокации. Под плотностью дислокации понимают их суммарную длину, которая приходится на единицу объема данного кристалла.

Под действием касательных напряжений дислокации могут двигаться, за счет чего в кристаллах возникают пластические деформации. Дислокации являются источниками внутренних напряжений, участки кристалла близ них находятся в упругонапряженном состоянии. Даже незначительное количество дислокаций может снизить прочность материалов на несколько порядков.

Очень высокую прочность, приближающуюся к теоретической, имеют нитевидные кристаллы, которые благодаря такой структуре имеют небольшое количество дислокаций. Эти кристаллы могут быть эффективными микроармирующими материалами для огнестойких и других изделий специального назначения. В некоторых случаях упрочнение материалов достигают введением легирующих добавок, которые предотвращают движение дислокаций.

Структура *аморфных материалов* (рис. 2.11), как и структура жидкостей, характеризуется так называемым ближним порядком, когда упорядоченное состояние наблюдается только между соседними частичками материала. К главным отличительным особенно-

## 2. Структура строительных материалов

стям аморфных, в том числе стекловидных структур, относятся изотропность свойств и отсутствие постоянной температуры плавления. Отсутствие кристаллической решетки ведет к плавному изменению свойств аморфных материалов при переходе их, например, из твердого состояния в жидкое. Аморфные тела можно рассматривать как переохлажденные жидкости. В отличие от жидкостей в них

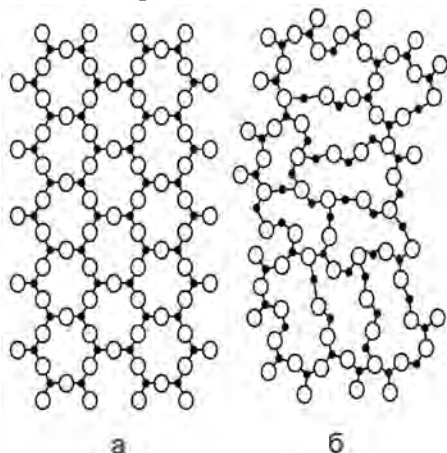


**Рис. 2.11.** Схема пространственной решетки кремнезема:  
а – кристаллического;  
б – аморфного

не происходит быстрого обмена местами между соседними частичками, что предопределяет их высокую вязкость.

К важнейшим методам исследования структур материалов относятся *рентгеновские методы*. Рентгеновские лучи, проходя через кристаллические решетки, испытывают дифракцию, поскольку межатомные расстояния в них соизмеримы с длиной волн рентгеновского излучения.

Расшифровывая рентгенограммы, можно определить реальные расстояния между

атомными плоскостями в кристаллических решетках по формуле Вульфа-Брегга:

$$n\lambda = 2d \sin\theta, \quad (2.3)$$

где  $n$  – порядок отражения лучей;  $\lambda$  – длина волн рентгеновских лучей;  $d$  – расстояние между плоскостями;  $\theta$  – угол между направлением пучка и плоскостями, которые отражают лучи.

Кристаллы на рентгенограммах дают характерные линии, отличающиеся расположением и интенсивностью (рис. 2.12). Определив расстояние между плоскостями и относительную интенсивность линий, можно сравнением с табличными данными, составленными предварительно для известных веществ, определить фазовый состав исследуемого материала. Расшифровка рентгенограмм также дает возможность определить характер дефектов, тип элементарной

ячейки, положение атомов или ионов и прочие особенности атомно-молекулярной структуры материалов.

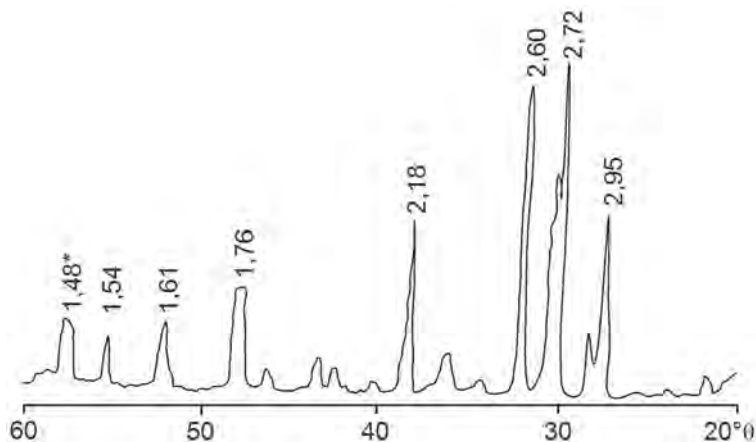


**Рис. 2.12.** Рентгенограмма трехкальцевого силиката  
(\* - над аналитическими линиями указаны  
межплоскостные расстояния (d) в  $10^{-10}$  м)

Рентгеновские лучи не рассеиваются атомными ядрами и слабо рассеиваются легкими атомами. Для изучения таких структур применяют *электронно-графический анализ*, основанный на использовании электронных волн, которые имеют длину на один-два порядка меньше чем рентгеновские волны и поэтому способны проникать в решетку на глубину не более чем 10 атомных слоев. Электронные волны получают в закрытой стеклянной трубке с вакуумом за счет пучка электронов от накаливаемого током высокого напряжения нити вольфрамового сплава. Использование пучка электронов с длиной волн на несколько порядков меньше длины волн видимого света положено также в основу электронной микроскопии, которая дает возможность изучать объекты размером 6-10 мкм при увеличении до 200 тыс. раз.

На квантовых представлениях основаны *спектроскопические* методы исследования структуры материалов. Для качественного фазового анализа применяют инфракрасную спектроскопию, основанную на способности химических соединений выборочно поглощать лучи в инфракрасных областях спектра (рис. 2.13).

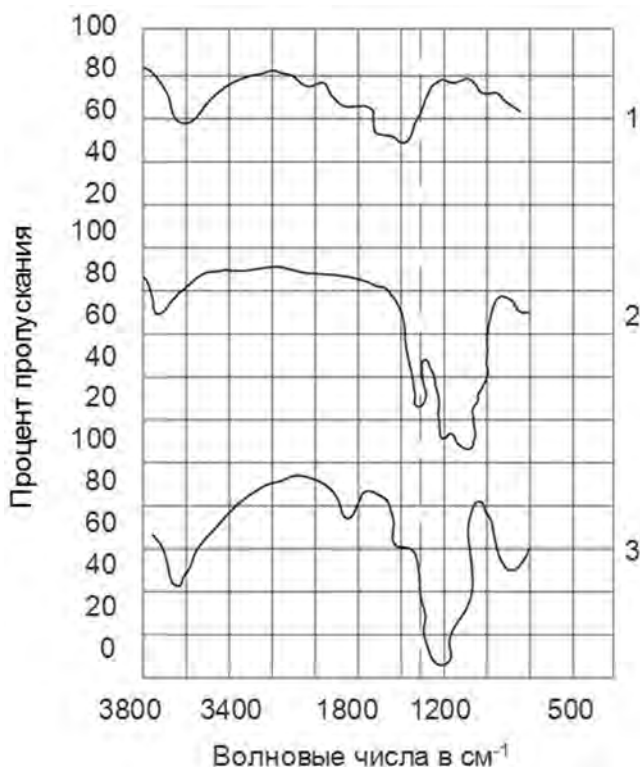


**Рис. 2.13.** Кривые поглощения в инфракрасной области спектра гидросиликатов кальция:  
1 – гиролит; 2 – ксонотлит; 3 – тоберморит

На явлении электронного парамагнитного резонанса, который заключается в резонансном поглощении энергии радиочастотного поля в веществах, содержащих парамагнитные частички, при наложении магнитного поля, основан метод, который дает возможность исследовать характер химических связей в материалах, их валентные состояния и ряд других структурных особенностей. Рентгеновскую спектроскопию применяют, изучая энергетические особенности атомно-молекулярной структуры и при химическом экспресс-анализе.



## 2.2. Наноструктура материалов

Наноструктуру имеют объекты, размеры которых находятся в диапазоне от 0,1 до 100 нм ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ).

Наноструктуры классифицируют на сплошные и пористые. К первым относят наночастицы – нанокристаллы и нанокластеры, нанопленки, нановолокна, к пористым – нанотрубки и объемные наноструктуры.

Нанокристаллы имеют непрерывную кристаллическую решетку, характеризующуюся анизотропией свойств и имеющую хотя бы один размер не более 100 нм. Кристаллические наночастицы образуют монокристаллы, не имеющие дефектов и межзеренных границ.

В нанокристаллическом состоянии вещества приобретают новые свойства, нехарактерные при макроскопических размерах. Нанокристаллы способны менять свои свойства под влиянием внешних воздействий (света, механических напряжений, электрических и магнитного полей, радиации, температуры, давления). Нанокристаллы можно получать различными способами из расплавов и растворов. Например, из растворов нанокристаллы могут быть выращены низкотемпературным способом в кристаллизаторе, где создается необходимое для роста кристаллов пересыщение, высокотемпературным способом с помощью расплавленных солей и др., а также гидротермальным способом за счет высокого давления (до  $300 \text{ МН/м}^2$ ). Нанокристаллы кварца, каменной соли, исландского шпата и некоторых других веществ встречаются в природе.

*Кластеры* – (англ. cluster – пучок, рой, скопление) наноразмерные комплексы отдельных атомов и молекул (рис. 2.14). Основное различие нанокластеров и нанокристаллов заключается в характере расположения атомов и молекул и химических связей между ними. Различают упорядоченные (магические) и неупорядоченные нанокластеры. В первых атомы или молекулы расположены в определенном порядке и довольно сильно связаны между собой. Возможно существование различных конфигураций, представляющих собой сочетания группировок из трех атомов, образующих равносторонний треугольник. Простейшей из таких конфигураций является тетраэдр.

Неупорядочные кластеры представляют собой неустойчивые формирования, которые по структуре аналогичны скоплениям молекул или атомов, возникающим за счет слабых ван-дер-ваальсовых сил.

К наноструктурам можно отнести *коллоидные системы*, имеющие особенно большое значение в технологии строительных материалов.

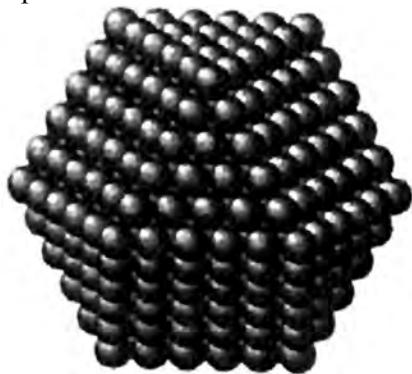


**Рис. 2.14.** Структура нанокластера с кубической упаковкой атомов металла

Для коллоидных систем можно применить ряд положений молекулярно-кинетической теории. В частности, в коллоидных растворах (золях) так же, как в истинных, дисперсные частички способны принимать участие в тепловом движении. Вместе с тем значительно большие сравнительно с обычными молекулами размеры коллоидных частичек предопределяют незначительное осмотическое давление коллоидных веществ, их медленную

диффузию. Все коллоидные системы седиментационно стойкие, так как сила тяжести в них уравнивается диффузией. Поскольку размеры коллоидных частичек меньше, чем длина волн видимого спектра, то свет они не отражают, а рассеивают. Если пропустить сквозь слой коллоидного раствора интенсивный пучок лучей света, то будем наблюдать светлую полосу (эффект Тиндалля). Изменение интенсивности светового потока, рассеянного твердыми частичками, положено в основу одного из методов исследования коллоидов – *нефелометрии*. Этот метод дает возможность определить концентрацию и средний размер коллоидных частичек, свойства гетерогенных, и в особенности коллоидных систем, обусловленные наличием поверхности раздела фаз между частичками дисперсной фазы и дисперсионной среды.

Молекулы поверхностного слоя находятся под действием молекулярного давления, поэтому на поверхности раздела фаз имеется избыток свободной энергии. Работа, затраченная на образо-

вание  $1 \text{ см}^2$  поверхности раздела фаз или эквивалентная ей энергия  $E$ , что приходится на  $1 \text{ см}^2$  площади поверхности  $f$ , называется поверхностным натяжением  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{E}{f}. \quad (2.6)$$

Минимизация свободной энергии и переход системы в термодинамически устойчивое состояние становятся возможными вследствие уменьшения поверхности раздела фаз, достигаемого самопроизвольной *коагуляцией* или слипанием частичек в коллоидных системах. Свободная энергия может уменьшаться за счет снижения поверхностного натяжения при поглощении активных веществ на поверхности раздела фаз — *адсорбции*. Этот процесс можно описать уравнением Гиббса:

$$\Gamma = \frac{-d\sigma}{dc} \cdot \frac{c}{RT}, \quad (2.7)$$

где  $\Gamma$  — адсорбция, моль/л;  $\sigma$  — поверхностное натяжение, Дж/см<sup>2</sup>;  $C$  — концентрация раствора, моль/л;  $R$  — газовая постоянная, Дж/моль·К;  $T$  — абсолютная температура, °К.

К *поверхностно-активным (ПАВ)* принадлежат вещества большей частью органического происхождения, в молекулы которых входят как полярные, так и неполярные группы (рис. 2.15). Эта особенность строения молекул ПАВ объясняет их способность адсорбироваться на поверхности раздела фаз (рис. 2.16) и ориентироваться так, чтобы полярные группы (ОН, СООН, NH<sub>2</sub> и др.) были направлены к полярным фазам системы (например, к молекулам воды), а неполярные (углеводородная цепь) — к неполярной фазе (например, воздуху).

В технологии строительных материалов широко используется явление *адсорбции ПАВ* на твердых поверхностях, в результате чего изменяется их смачиваемость, уменьшается твердость (эффект Ребиндера), улучшается пластичность и изменяются другие свойства.

Адсорбция на твердых поверхностях (адсорбентах) не диссоциирующих или слабодиссоциирующих веществ (молекулярная адсорбция) обратима и с повышением температуры уменьшается. При адсорбции из водных растворов сильных электролитов (ионная адсорбция) процесс характеризуется необратимостью и

увеличением интенсивности при повышении температуры. Если молекулярная адсорбция обусловлена силами молекулярного взаимодействия, то ионная приводит к образованию химических соединений (хемосорбция).

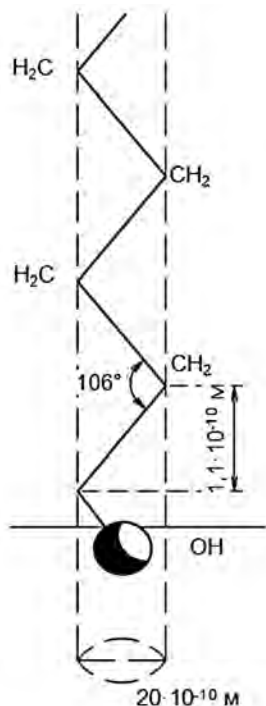


**Рис. 2.15.**  
Схема  
молекулы  
поверхностно-  
активного  
вещества

При ионной адсорбции, когда на поверхности адсорбента сорбирован другой электролит, чем тот, что находится в растворе, происходит ионный обмен и одни ионы вытесняют другие. Адсорбенты, способные к ионному обмену, называют *ионитами*. Поглощение ионов тем сильнее, чем выше их валентность и больше масса. Ионный обмен дает возможность регулировать стойкость, вязкость и прочие структурно-механические свойства технических дисперсий, которые используют при производстве керамики, цемента и других материалов.

Коллоидные частички характеризуются определенными зарядами и перемещаются в электрическом поле к противоположно заряженному электроду (*электрофорез*). Вследствие разности потенциалов жидкая фаза в коллоидной системе способна перемещаться относительно неподвижной твердой пористой среды (*электроосмос*).

Электрокинетические явления, характерные для коллоидов, используют в технике, в том числе в технологии строительных материалов. Так, с помощью электрофореза можно подготовить керамические массы для формования фарфоро-фаян-

совых изделий, отделить от них мелкие частички, которые не поддаются фильтрации, получить резиновые изделия из латексов и др. Электроосмос используют при обезвоживании древесины и других видов промышленной обработки разнообразных пористых материалов.

В результате перераспределения электрического заряда на границе раздела двух фаз разного химического состава возникает *двойной электрический слой* (рис. 2.17), состоящий из двух частей: более плотной внутренней и диффузной внешней. Разность потенциалов между двумя частями двойного электрического слоя называют *электрокинетическим*, или  *$\xi$ -потенциалом* ( $\xi$ -дзета). Потенциал определяют по скорости электроосмоса или электрофореза. Он имеет большое значение для характеристики коллоидных систем, в частности, характеризует их устойчивость. На величину и знак  $\xi$ -потенциала существенно влияют добавки ПАВ и электролитов.

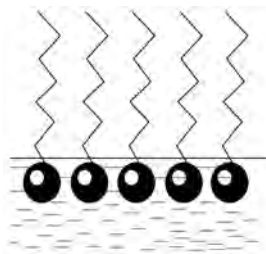


**Рис. 2.16.**  
Адсорбционный слой

Если  $\xi$ -потенциал равняется нулю (изоэлектрическое состояние), то система неспособна иметь электрокинетические свойства. Если  $\xi$ -потенциал составляет 25-30 мВ, то происходит коагуляция, то есть агрегация коллоидных частичек. Вследствие

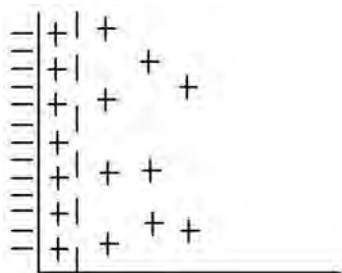


**Рис. 2.17.** Схема двойного электрического слоя

сцепления хаотически распределенных твердых частичек дисперсной фазы в суспензиях и коллоидных растворах образуется пространственная сетка или коагуляционная структура.

Образование коагуляционных структур характерно для многих материалов, например, на основе вяжущих веществ в первый период их твердения. Характерным признаком их начального твердения является

возникновение самопроизвольно восстанавливаемых после разрушения коагуляционных контактов (рис. 2.18). Прочность этих контактов обусловлена слабыми Ван-дер-Ваальсовскими молекулярными силами сцепления сквозь тончайшие прослойки дисперсионной среды, толщина которых соответствует минимальному значению поверхностной энергии. Сила взаимодействия частичек дисперсной фазы в коагуляционных структурах составляет в сред-

нем  $10^{-10}$  Н на контакт. Сила связи коагуляционных контактов резко уменьшается, если поверхности частичек покрыты ПАВ. Адсорбируясь, ПАВ раздвигают частички, по меньшей мере, на расстояние двух молекулярных слоев, экранируя энергетически наиболее активные участки частичек. Коагуляционные структуры иногда называют гелями (рис. 2.19).

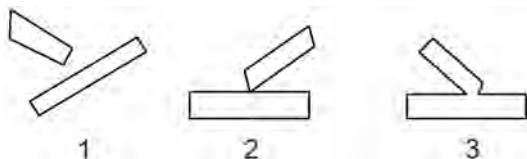


**Рис. 2.18.** Виды контактов в пространственных структурах:  
1 – коагуляционные; 2 – точечные (после высыхания); 3 – фазовые (после спекания или срастания)

Под гелеобразованием понимают переход коллоидного раствора из свободно-дисперсного состояния (*золь*) в связно-дисперсное (*гель*). На гелеобразование, то есть на процесс *коагуляции*, влияют разные факторы, в частности форма час-

тичек, концентрация дисперсной фазы, температура смеси, виды механических воздействий (смешивание, вибрирование). Коагуляцию вызывают электролиты, при этом коагулирующая сила ионов связана с их зарядом. Для одновалентного катиона она приблизительно в 350 раз более слабая, чем для трехвалентных. Порог коагуляции, то есть наименьшее количество электролита, нужное для начала коагуляции, обратно пропорционален шестой степени заряда коагулирующего иона.

Различают две формы коагуляции – явную и скрытую. При явной коагуляции система разделяется на две макрофазы – осадок и жидкую среду. При скрытой коагуляции агрегирование частичек можно обнаружить лишь специальными методами, например, по изменению электрокинетического потенциала.

Процесс обратный коагуляции, то есть переход агрегированных частичек в исходное коллоидное состояние, называется *пептизацией*. Он может происходить под влиянием веществ-пептизаторов, способствующих деагрегированию осадков (например, добавки электролитов, ПАВ). Так, глинистые шликеры при получении керамических изделий разжижаются под влиянием щелочей. Эффект пептизации с помощью ПАВ используют также для разжижения

сырьевых шламов при получении цементного клинкера и в других технологиях строительных материалов.

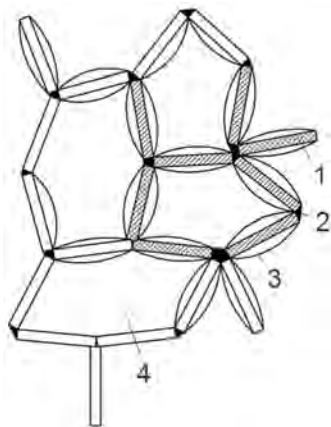


**Рис. 2.19.**

Пространственная  
структура геля:

1 – частичка  
дисперсной фазы;

2 – участки  
поверхности частичек,  
утративших стойкость;

3 – участки  
поверхности частичек,  
сохранившие  
стойкость;

4 – структуры,  
заполненные  
дисперсионной средой

Коагуляционные структуры разжижаются также под влиянием механических воздействий при смешивании, встряхивании или вибрировании. Этот изотермический процесс, который протекает по типу гель-золь, называют *тиксотропией*. Явление тиксотропии свидетельствует о том, что в коагуляционных коллоидных системах структурообразование происходит за счет Ван-дер-Ваальсовских сил. После прекращения механических воздействий связи, разрушенные в коагуляционной структуре, восстанавливаются.

Тиксотропию широко используют в технологиях строительных материалов, например, для вибрационного уплотнения бетонных смесей.

Свойства коллоидных растворов можно связать также с их мицеллярным строением. *Мицелла* – это наименьшее количество коллоидного вещества, в котором частички дисперсной фазы (ядро) находятся в определенной физико-химической связи с раствором через двойной электрический слой ионов (рис. 2.20).

Влияние мицеллярного строения ощутимо сказывается на свойствах строительных материалов. Например, твердая дисперсная фаза битума – асфальтены образуют ядра, окруженные оболочкой жидкой среды – от тяжелых смол до сравнительно легких масел. В случае избытка жидкой среды мицеллы не контактируют между собой и свободно перемещаются под влиянием броуновского движения. Такая структура характерна для жидких битумов. При нагревании вязкого битума коллоидный раствор типа гель разрушается,

## 2. Структура строительных материалов

если концентрация мицелл увеличивается, то битум снова приобретает структуру геля.

Коагуляционные структуры для многих строительных материалов, в частности на основе вяжущих веществ являются первичными. Они с течением времени переходят в *конденсационно-кристаллизационные* (по П.А. Ребиндеру). При образовании таких структур развивается сетка химических связей (например, при пространственной полимеризации, образовании геля кремнекислоты в воде, обжиге керамических и других изделий). Конденсационно-кристаллизационные структуры с характерными необратимыми контактами имеют высокую прочность, низкую пластичность и не восстанавливаются после механического разрушения.

Наряду с коагуляционными и конденсационно-кристаллизационными структурами возможны и структуры промежуточного типа. Если прочность коагуляционной структуры превышает некоторую величину, то ее механическое разрушение становится необ-

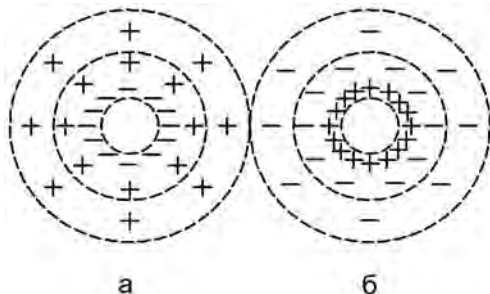


**Рис. 2.20.** Строение мицеллы:  
а – с отрицательно заряженной  
частичкой; б – с положительно  
заряженной частичкой

ратимым. Среди таких объектов, например, высушенные керамические пасты, отпрессованные полусухим способом порошки. В таких случаях в образуемых структурах обнаруживаются точечные или псевдокоагуляционные контакты средней прочности, им присущ коагуляционно-конденсационный характер.

## 2.3. Микроструктура материалов

На микроуровне изучают такие элементы структур – материалов, которые можно обнаружить с помощью оптического или электронного микроскопа. Их размеры составляют  $10^{-4}$ - $10^{-7}$ м, они характерны для элементов микрогетерогенных систем. Для бетонов это элементы структуры цементного камня и контактного слоя, керамики - кристаллические и стекловидные фазы.



Типичные микрогетерогенные системы – это порошки, суспензии, эмульсии и пены. Для микрогетерогенных систем в отличие от коллоидных броуновское движение не характерно. Частички в таких системах перемещаются под влиянием веса, поэтому они седиментационно нестойкие.

*Порошки*, широко используемые в технологии строительных материалов, можно рассматривать как дисперсные системы, дисперсионной средой в которых служит воздух. Порошки получают, преимущественно используя разные методы измельчения. Дисперсность порошков контролируют по величине удельной поверхности и зерновому составу. Из методов определения удельной поверхности строительных порошков распространен метод, основанный на измерении сопротивления, которое оказывает слой исследуемого материала воздуху, проходящему сквозь этот слой. Для пористых порошков применяют также адсорбционный метод, основанный на зависимости:

$$S = \Gamma N S_0, \quad (2.8)$$

где  $\Gamma$  – адсорбция на поверхности порошка (например, количество азота, адсорбируемое на поверхности цементных частичек);  $N$  – число Авогадро;  $S_0$  – площадь поверхности, покрываемая одной молекулой адсорбированного вещества.

Для определения зернового состава порошков используют ситовый и седиментационный анализы. Седиментационный анализ основан на том, что скорость оседания частичек в жидкой среде изменяется в зависимости от их размеров.

Уменьшение размеров зерен в порошках ниже критического уровня вызывает их слипание и гранулирование. Гранулирование порошков происходит благодаря уменьшению поверхностной энергии системы при слипании частичек. Активизации этого процесса способствует смачивание поверхности твердой фазы жидкостью. Это обеспечивает образование на границе раздела прослойки с повышенной вязкостью, которая увеличивает адгезионное взаимодействие.

По форме в порошкообразных материалах различают изометричные (шарообразные, многогранные) и неизометричные (волокнистые или в виде игл, пластинчатые и т.п.) зерна. Существует много переходных форм зерен. Неизометричность зерен влияет на их

расположение в пространстве и приводит к анизотропности свойств порошков.

Важное практическое значение имеют особенности поверхности зерен, которые определяются способами и условиями их получения.

В простейшем случае, шарообразные зерна в зависимости от характера их пространственного расположения (кубическое, ромбоэдрическое, гексагональное) касаются соседних зерен в 6, 8 или 12 точках. При этом свободное пространство между зернами (пустотность или межзерновая пористость) занимает от 47,64 до 25,95%. В реальных порошках общая пористость в свободно насыпном состоянии, включая собственную пористость зерен, составляет обычно 50-80%.

*Суспензии и эмульсии* – это микрогетерогенные системы, в которых твердая или жидкая дисперсные фазы распределены в жидкой дисперсионной среде. В производстве строительных материалов суспензии широко используют при получении сырьевых шламов, шликеров, растворов. Эмульсии применяют в частности как лакокрасочные материалы. Концентрированные суспензии называют *пастами*.

Для обеспечения агрегативной устойчивости суспензий и эмульсий, то есть предотвращения коагуляции (слипание капель эмульсии называют *коалесценцией*), нужно, чтобы их частички были покрыты оболочками из молекул дисперсионной среды (*сольватными оболочками*). Это возможно, если дисперсионная среда смачивает частички дисперсной фазы. Смачиваемость частичек можно улучшить, используя добавки ПАВ. Стабилизации системы способствует образование вокруг минеральных частичек двойного электрического слоя ионов.

Эмульсии могут быть прямыми и обратными (рис. 2.21). В прямых эмульсиях, или эмульсиях первого рода, дисперсная фаза представлена неполярной или слабополярной жидкостью (например, маслом), а дисперсионная среда – неполярная. Водорастворимые эмульгаторы способствуют образованию эмульсий типа масло в воде (М/В), а нерастворимые – типа вода в масле (В/М). Характерными эмульгаторами являются высокомолекулярные соединения и мыла. Эмульгаторами могут быть также порошки, которые хорошо смачиваются дисперсионной средой и имеют размеры зерен как минимум на порядок меньше размера частичек дисперсной фазы.

На практике в некоторых случаях необходимо вызвать ускоренный распад эмульсии. С этой целью используют вещества, которые имеют высокую поверхностную активность, но при этом не образуют прочных пленок в адсорбционных слоях (деэмульгаторы).

Как строительные материалы широко применяют эмульсии на основе органических вяжущих веществ – битума, дегтя, полимеров и т.п.

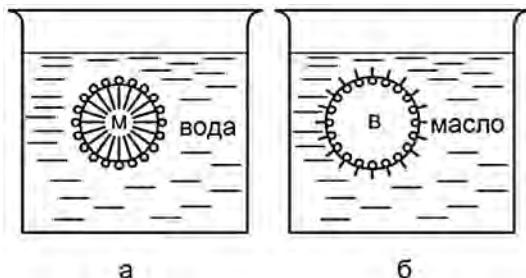


**Рис. 2.21.** Типы эмульсий:  
а – прямая М/В; б – обратная В/М

Эмульсии бывают анионными и катионными. Для получения первых используют анионные ПАВ (это преимущественно высшие органические кислоты или их щелочные мыла). Для получения вторых применяют эмульгаторы катионного типа – соли аминов, амидо-аминные

мыла и др. Для ускорения или регулирования распада, например, битумных эмульсий применяют 0,5-1% калиево-алюминиевых квасцов, солей хрома, магния, калия.

К пенам относят высококонцентрированные системы, в которых дисперсная фаза – газ, дисперсионная среда – жидкость. Как строительные материалы, преимущественно теплоизоляционные, применяют твердые пены, в которых перегородки между газовыми пузырьками представлены твердой фазой (пенопласты, пеностекло, газо- и пенобетоны). Для получения стойких пен используют пенообразователи – высокомолекулярные вещества, мыла и прочие соединения, которые имеют высокую поверхностную активность. Основные показатели пен – кратность, дисперсность и стойкость.

Кратность пены – это отношение ее объема к объему жидкой или твердой фазы, которая образует стенки пузырьков. Строительными материалами служат обычно пены с кратностью 5-10. Для другой цели, например для гашения пожаров, используют пены с кратностью 90 и больше.

Стойкость пены измеряется сроком ее существования и зависит от прочности пленок.

Пены, как и другие дисперсные системы, можно получить двумя путями: конденсационным – объединением очень мелких пузырьков в более крупные и дисперсионным – измельчением крупных пузырьков и газовых включений.

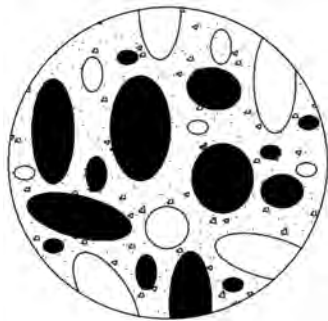


**Рис. 2.22.** Структура горной породы – конгломерата

Ряд строительных материалов, в частности на основе вяжущих веществ и заполнителей, образует конгломератный тип структуры. Термин “*конгломерат*” (от лат. *conglomeratus*) означает механическое объединение разнообразных компонентов. Конгломератом называют также обломочную породу, которая состоит из обкатанных обломков горного происхождения, сцементированных глиной, оксидами железа, кремнеземом и т.п. (рис. 2.22).

На микроструктурном уровне изучают вяжущую часть конгломератов. Ее (по И.А. Рыбьеву) можно рассматривать как своеобразный микродисперсный конгломерат, в котором есть цементирующие вещества и поровое пространство. Цементирующие вещества вяжущих, которые отвердевают за счет химического взаимодействия с водой или водными растворами, представлены гидратными новообразованиями, а синтетических вяжущих на органической основе – отвердевшими полимерами. Гидратные новообразования цементного камня по классификации А.Е. Шейкина в зависимости от их дисперсности можно разделить на три группы: коллоидные – меньше чем  $10^{-6}$  м (тоберморитовый гель); субмикрористаллические –  $10^{-6}$ - $10^{-5}$  м (фазы, в состав которых входят  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ); микрокристаллические – свыше  $10^{-5}$  м ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Субмикрористаллические и микрокристаллические новообразования составляют кристаллический сросток. Микрофотографии цементного камня показывают, что кристаллический сросток заполняется гелеподобными продуктами гидратации.

Особенности микроструктуры материалов существенно зависят от количества наполнителей, их дисперсности и физико-химической активности поверхности. *Наполнители* – это высокодисперсные компоненты материалов, которые самостоятельно

не образуют структуру твердения, но активно влияют на ее формирование вместе с цементирующими веществами. В строительных материалах на основе минеральных вяжущих наполнители образуют первичные адгезионные контакты на стадии формирования коагуляционной структуры, которые переходят по мере гидратации в необратимые контакты срастания. Наполнители, уменьшая энергию на поверхности раздела фаз, ускоряют тем самым кристаллизацию новообразований. Они также могут вступать в химическое взаимодействие с продуктами гидратации вяжущего и увеличивать таким образом объем новообразований. Переход вяжущих веществ в наполненных системах от объемного состояния к тонкопленочному дает возможность существенно улучшить их технические свойства и уменьшить затраты.

Микроструктурам конгломератных материалов присуща значительная неоднородность. Частички вяжущего и наполнителей образуют агрегаты – *кластеры* разных размеров. При оптимальных размерах зерен и их соотношении происходит взаимопроникновение кластеров и их срастание, вследствие чего прочность структуры возрастает.

Важнейшими элементами микроструктуры материалов, определяющими их свойства, являются *поры*. Самые мелкие поры (ультра-микропоры) возникают вследствие анизотропии свойств кристаллов и частичек конденсационных структур, а также их случайной ориентации в пространстве в процессе роста. Примерами таких пор являются поры в частичках гидратированного цемента (так называемые *гелевые поры*), размер которых составляет  $(15-30) \cdot 10^{-8}$  м. Вода в них находится под сильным действием поля сил стенок пор. По этой причине много ее свойств (плотность, вязкость, теплопроводность и т.п.) имеют аномальный характер. Более крупные поры искусственных материалов большей частью имеют технологическое происхождение. Они возникают вследствие неплотной укладки смеси, защемления воздуха, испарения избыточной воды, деструктивных процессов выщелачивания, дегидратации, выветривания и т.п.

Поры можно разделить на две группы: *капиллярные* и *некапиллярные*. В капиллярных порах поверхность жидкостей при-

## 2. Структура строительных материалов

обретает форму, обусловленную силами поверхностного натяжения, и мало искажается за счет веса.

Для капилляров с радиусом  $r$  характерен подъем жидкости за счет действия капиллярных сил. Высота капиллярного всасывания  $h$  определяется по формуле Жюрена:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r g \rho_{\text{ж}}}, \quad (2.9)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение;  $\theta$  – краевой угол смачивания;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости.

*Микрокапилляры* ( $r < 0,1$  мкм) в результате характерного для них эффекта капиллярной конденсации могут быть полностью заполнены жидкостью за счет поглощения ее паров из окружающей среды. *Макрокапилляры* ( $1,0 > r > 0,1$  мкм) могут быть заполнены жидкостью только в случае непосредственного контакта с ней. Кроме того, особенностью макрокапилляров есть то, что они не только не адсорбируют влагу из воздуха, а наоборот отдают ее в атмосферу.

Все материалы, которые содержат поры, можно разделить (по А.В. Лыкову) на *капиллярно-пористые* и *пористые*. Капиллярно-пористыми называют материалы, для которых капиллярный потенциал значительно превышает потенциал поля тяжести. Капиллярный потенциал  $\psi_{\text{к}}$  – это потенциальная энергия поля капиллярных сил, отнесенная к единице массы жидкости:

$$\psi_{\text{к}} = hg. \quad (2.10)$$

Потенциал поля тяжести  $\psi_{\text{п.т.}}$  можно найти из условия:

$$\psi_{\text{п.т.}} = \frac{mgh_1}{m} = gh_1, \quad (2.11)$$

где  $m$  – масса тела;  $h_1$  – высота над уровнем моря.

Если капиллярный потенциал одного и того же порядка, что и потенциал поля тяжести, то материал можно считать просто пористым телом. Капиллярно-пористыми телами являются, в частности, глина, керамика, бетон, древесина, а пористыми – песок, щебень. Особенности пористого строения существенно влияют как на свойства материалов, так и на оптимальные режимы их обработки.

Чтобы оценить влияние структуры на свойства материалов, применяют понятие *пористости* – отношение объема пор к об-

щему объему материала. Интегральными параметрами порового пространства служат истинная (или полная), открытая (или кажущаяся), условно-замкнутая пористость. При этом важно различать поры по их размерам, форме, происхождению и т.п. На рис. 2.23 представлены типы пористых структур (по Ф.М. Иванову).

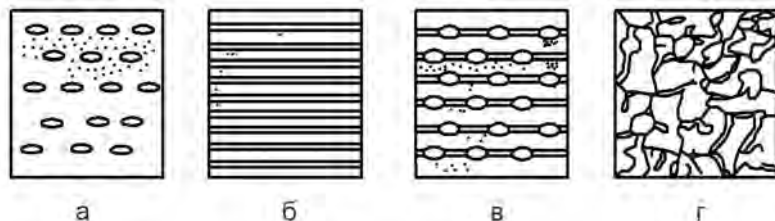


**Рис. 2.23.** Схемы типов структур цементного камня:

- а – схема с шарообразными порами;
- б – то же, с цилиндрическими;
- в – то же, с порами переменного сечения;
- г – схема структуры цементного камня

Существует ряд методов определения пористости и структуры порового пространства. Для определения ультрамикропор применяют, например, метод адсорбции гелия, микропор – методы электронной микроскопии, адсорбции азота и метанола, макропор – ртутную порометрию.

## 2.4. Макроструктура материалов

На макроскопическом уровне структуру материалов рассматривают, если размеры частичек составляют свыше  $10^{-4}$  м. Макроструктуру изучают невооруженным глазом или при незначительном увеличении. При этом можно определить особенности строения и дефектов материалов, обусловленных процессами их формирования, производства и эксплуатации (например, дефекты литейного происхождения у металлов, пороки древесины, пузырьки и посторонние включения в стекле, трещины и раковины в бетоне).

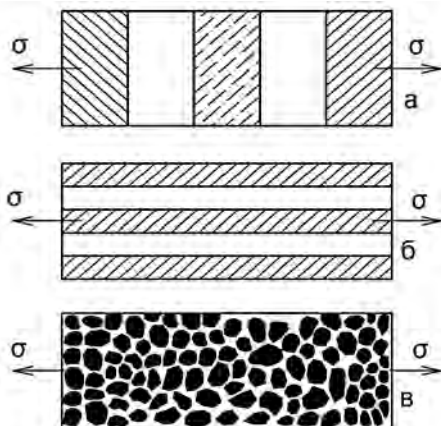


**Рис. 2.24.** Схемы структур:  
а – последовательно сложенной;  
б – параллельно сложенной;  
в – конгломератного материала

рассматривать как систему цементный камень – заполнитель (иногда под макроструктурой бетона понимают систему цементно-песчаный раствор – щебень), а макроструктуру ситаллов – как систему стекловидное связующее – кристаллический наполнитель. Двухкомпонентные структуры можно разделить на

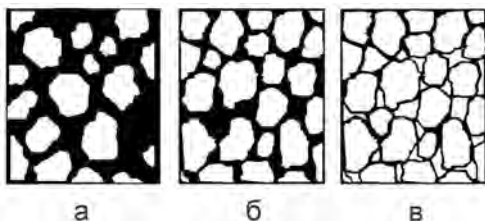


**Рис. 2.25.** Схемы макроструктур конгломератного типа:  
а – с базальной цементацией;  
б – поровая; в – контактная

Изучение макроструктуры материалов конгломератного типа дает возможность определять относительное количество вяжущих материалов и заполнителей, их распределение, а иногда и минералогический состав, размер и форму зерен, характер поверхности, форму и количество макропор и т.п.

В ряде случаев сложные многокомпонентные структуры можно свести на макроуровне к двухкомпонентным. Например, макроструктуру бетона можно

рассматривать как систему цементный камень – заполнитель (иногда под макроструктурой бетона понимают систему цементно-песчаный раствор – щебень), а макроструктуру ситаллов – как систему стекловидное связующее – кристаллический наполнитель. Двухкомпонентные структуры можно разделить на параллельно и последовательно составленные (рис. 2.24). Однако наиболее часто встречаются смешанные параллельно-последовательные структуры.

Конгломератные двухкомпонентные структуры (рис. 2.25) разделяют на три группы (по И.М. Грушко) в зависимости от

степени раздвижки зерен заполнителя. Если структура материала с *базальной цементацией*, то зерна заполнителей не образуют контакты между собой, они как бы плавают в связующей массе. Свойства материала при такой макроструктуре



обусловлены преимущественно свойствами связующей матричной части. Заполнители, действуя как концентраторы напряжений, могут ухудшать механические свойства конгломерата. По мере насыщения структуры зернами заполнителя образуется плотный каркас, склеенный тонкой прослойкой искусственного или природного вяжущего. Такую структуру называют *поровой*. Она благоприятна как с точки зрения расхода вяжущего, так и придания материалам необходимых технических свойств.

*Контактная структура* характеризуется максимальным насыщением материала, когда вяжущего недостаточно для заполнения пустот между зернами заполнителя, и в ряде случаев, для образования сплошной оболочки на их поверхности.

Показателем макроструктуры является *коэффициент упаковки* зерен:

$$K_v = \frac{l_{np} - D}{D}, \quad (2.12)$$

где  $l_{np}$  – проекция расстояния между центрами соседних зерен;  $D$  – диаметр зерен (при разном диаметре зерен  $D = r_1 + r_2$ , где  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы соседних зерен).

При  $K_v > 0$  зерна заполнителя разделены прослойкой вяжущего; при  $K_v = 0$  – вступают в контакт; при  $K_v < 0$  – защемляются, то есть заходят одно за другое (рис. 2.26).

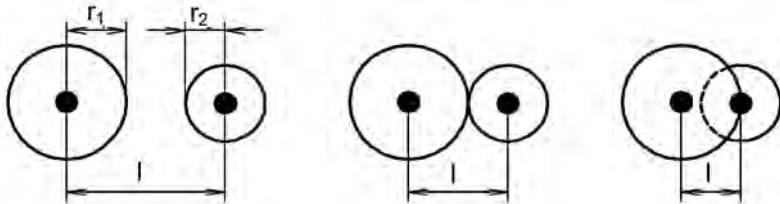


**Рис. 2.26.** Схема размещения частиц в структурах при определении коэффициента упаковки

Расчетом можно показать, что плотности укладки шарообразных зерен, размещенных рядами и в шахматном порядке в единице объема, существенно отличаются (рис. 2.27). В первом случае количество шаров, которые можно уложить в единице объема  $n_v = n^3 = 1/D^3$ , объем шаров  $V_{ш} = (n_v \pi D^3)/6 = \pi/6$ ; во втором соответственно:  $n_v^I = 4/3D^3$ ,  $V_{ш}^I = n_v^I \pi D^3/6 = 2\pi/9$ .

## 2. Структура строительных материалов

Объем пустот при расположении зерен-шаров рядами:

$$V_n = 1 - \pi/6 = 0,476; \quad (2.13)$$

в шахматном порядке:

$$V_n^I = 1 - 2\pi/9 = 0,3. \quad (2.14)$$

Макроструктуры различаются также абсолютными и относительными размерами зерен. Предельные размеры зерен для мелко-, средне- и крупнозернистых структур могут быть разными в зависимости от вида материала. Например, структуры горных пород относятся к мелкозернистым, если размеры зерен меньше чем 2 мм, бетонов – 5 мм; к среднезернистым – соответственно 2-5 мм и 5-20 мм; к крупнозернистым – свыше 5 и 20 мм.

По степени равномерности распределения зерен выделяют равномерно- и неравномернозернистые структуры. Типичными разновидностями неравномернозернистых структур являются *порфировые* структуры, характеризующиеся наличием в материале стекловидной или тонкозернистой основной массы, в которой рассеяны отдельные крупные кристаллы – вкрапленники. Такие структуры имеют излившиеся горные породы, ряд конгломератных материалов искусственного происхождения.

Структура строительных материалов с течением времени изменяется под влиянием процессов, обусловленных как внутренней их природой, так и окружающей средой. Эти процессы могут быть конструктивными, улучшающими структуру и свойства

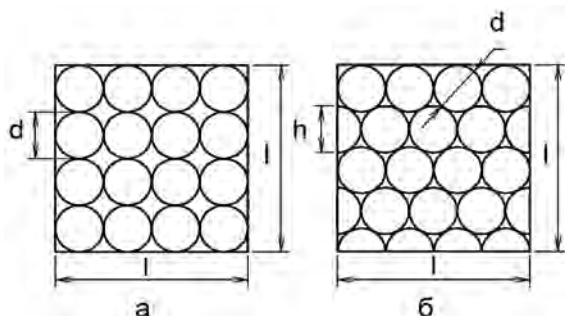


**Рис. 2.27.** Размещение шарообразных зерен:

а – при рядовой укладке;  
б – при шахматной укладке

ва материала, и деструктивными. Так, развитие новообразований в процессе гидратации повышает прочность бетонов, улучшает ряд других свойств, но вместе с тем под влиянием агрессивных факторов окружающей среды происходят корро-

зионные процессы, которые имеют разрушительный характер. Высокая долговечность материала достигается при формировании такой его структуры, при которой влияние деструктивных процессов становится минимальным. Характерным примером направленного формирования такой структуры является образование в бетоне с помощью добавок ПАВ воздушных пор, равномерно распределенных во всем объеме. Такие поры предотвращают увеличение давления воды, которое возникает при ее замерзании, а также уменьшают капиллярное подсосывание воды вследствие гидрофобизации поверхности капилляров.

На развитие деструктивных процессов влияют дефекты структуры материалов – открытые, крупные поры, трещины и т.п. Опаснейшими порами являются капилляры, заполненные водой.

*Трещины* – элементы структуры строительных материалов, которые можно рассматривать как нарушения их сплошности. Они имеют две свободных поверхности, которые смыкаясь, образуют острую вершину. Трещины разделяют на технологические и эксплуатационные. Причинами зарождения трещин могут быть объемные деформации материалов и их отдельных компонентов, температурные и влажностные градиенты, осмотические явления, коррозионные воздействия среды эксплуатации и др. Трещины могут возникать вследствие механической, электрохимической, термической или других видов обработки материалов.

Каждый вид трещин проходит определенную эволюцию. Зарождение трещин связывают, как правило, с перемещением и видоизменением дислокаций в кристаллических решетках. Условие распространения трещин в поликристаллических материалах выражается уравнением Гриффитса-Орована:

$$\sigma = \sqrt{Ev/d_{cp}}, \quad (2.15)$$

где  $\sigma$  – напряжение;  $E$  – модуль упругости;  $v$  – эффективная энергия разрушения;  $d_{cp}$  – средний размер кристаллита.

В соответствии с теорией Гриффитса рост трещин должен быть энергетически выгодным процессом, т.е. распространение должно сопровождаться уменьшением внутренней энергии ма-

## 2. Структура строительных материалов

---

териалов. Освобождающаяся энергия деформации пропорциональна квадрату длины трещины. Критическая длина трещины, при превышении которой возможен ее рост, уменьшается с ростом напряжений в материале. Трещины, существенно снижая прочность материалов, являются “воротами агрессии”. В особенности опасны трещины в хрупких материалах и в конструкциях, которые поддаются циклической нагрузке. Трещины выявляют с помощью визуального обзора, ультразвуковой и магнитной дефектоскопии, люминесцентных жидкостей, просвечивания и др.

Особенности структуры материалов на всех структурных уровнях оказывают определяющее влияние на их строительнотехнические свойства. При получении строительных материалов с заданными свойствами необходимо учитывать принцип их полиструктурности, заключающийся в том, что различные виды структур от атомно-молекулярной до макроструктуры переходят и проникают друг в друга, активно влияя на формирование свойств, т.е. отношение материалов к воздействию физикомеханических и физико-химических факторов окружающей среды.

### 3. ОБЩИЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Свойства материалов характеризуют особенности их физического состояния и отношение к различным физическим, химическим и технологическим факторам. Их можно рассматривать как “отклики” структуры и состава материала на воздействие факторов окружающей среды.

#### 3.1. Механические свойства

Важнейшими для строительных материалов являются механические свойства, характеризующие их отношение к внешним силовым воздействиям (табл. 3.1). Механические свойства неразрывно связаны со структурой материалов, силами сцепления между частицами, особенностями их теплового движения.

**Деформативные свойства.** Силовые воздействия на материал вызывают изменения расстояния между слагающими его частицами

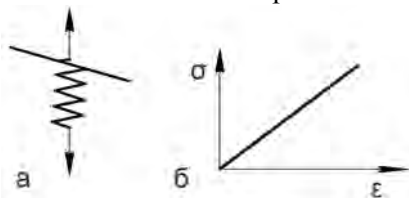


**Рис. 3.1.** Модель идеального  
твёрдого тела,

подчиняющаяся закону Гука:

а – модель упругого тела;

б – график,  $\sigma$  – напряжение;

$\epsilon$  – относительная деформация

или их сдвиг. Способность материалов восстанавливать форму и объем (твёрдые материалы) или только объем (жидкие и газообразные материалы) после прекращения действия внешних сил называют *упругостью*. Для кристаллических материалов упругость вызывается силами притяжения между частицами, образующими пространственную решетку. Раздвинутые под влиянием механических усилий элементы решетки после разгрузки стремятся в исходное положение (рис. 3.1).

Свойство ряда материалов приобретать значительные упругие деформации под действием сравнительно небольших нагрузок и восстанавливать размеры и форму после их снятия называется *эластичностью*. Высокоэластичные материалы (резина, поролон и др.) после снятия напряжения практически мгновенно восстанавливают

### 3. Общие свойства строительных материалов

форму и размеры. Эластичные деформации имеют обычно выраженный анизотропный характер.

Таблица 3.1

Механические свойства некоторых материалов

| Материал                             | Предел прочности, МПа |            | Твердость, МПа | Истираемость, г/см <sup>2</sup> | Ударная вязкость, кДж/м <sup>3</sup> | Модуль упругости, 10 <sup>3</sup> МПа |
|--------------------------------------|-----------------------|------------|----------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
|                                      | сжатие                | растяжение |                |                                 |                                      |                                       |
| Гранит, сиенит, диорит               | 100...250             | 5...6,5    | –              | 0,05...0,1                      | –                                    | 30...60                               |
| Известняк                            | 3,5...200             | 6,7...7,5  | –              | 2...5                           | –                                    | 10...60                               |
| Бетон тяжелый                        | 5...80                | 1,1...3,5  | 220...800      | 0,6...1,5                       | 2...4,5                              | 19...40                               |
| Чугун                                | 800...1000            | –          | 2000           | –                               | 10...20                              | 80...160                              |
| Кирпич клинкерный                    | 40...100              | –          | –              | 0,2...0,4                       | –                                    | –                                     |
| Сосна (вдоль волокон, влажность 12%) | 36...48               | 70...130   | 21...26        | –                               | 42                                   | 12                                    |
| Стекло оконное                       | 600...700             | 30...35    | 4000...6000    | –                               | 2                                    | 48...83                               |
| Шлакоситаллы                         | 500...650             | –          | 100...400      | 0,015                           | 4,5...6                              | –                                     |
| Стеклотекстолит                      | –                     | 110...300  | 200...220      | –                               | 50...116                             | 11...21                               |

Напряжения, развиваемые в материалах при их нагружении, достигают определенного критического значения, после чего начинают проявляться необратимые (пластические) деформации (рис. 3.2). Строго определить границу между упругим и пластическим состоянием трудно, поэтому обычно определяют *условный предел упругости* – напряжение, при котором в материале наблюдается остаточная деформация 0,01%. Следует отметить, что хрупкие материалы разрушаются, не достигая условного предела упругости.

Относительные деформации материалов в упругой области пропорциональны действующим напряжениям (закон Гука):

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (3.1)$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение;  $E$  – модуль упругости при растяжении;  $\epsilon$  – относительная деформация.

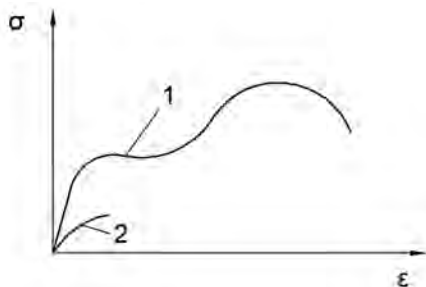


**Рис. 3.2.** Влияние напряжений на относительные деформации материалов:  
1 – сталь; 2 – бетон

*Модуль упругости* материалов определяется прочностью межатомных связей и связан с такими свойствами как прочность, твердость, температура плавления и др.

Экспериментальные методы определения модуля упругости разделяют на статические и динамические. При статических методах образец материала подвергают действию постоянной или медленно изменяющейся нагрузки и определяют возникающие деформации. Соотношения значений деформаций в поперечном и продольном направлениях в упруго растянутом материале называют *коэффициентом Пуассона*.

При применении динамических методов на образец воздействуют импульсами высокочастотных колебаний и модуль упругости  $E_d$  определяют по скорости распространения упругой волны  $V_{y.v.}$ , возникающей в материале, используя формулу:

$$V_{y.v.} = (E_d / \rho)^{1/2}, \quad (3.2)$$

где  $\rho$  – плотность материала.

Применяют также резонансный метод, основанный на определении собственной частоты колебаний образца. Если образцы изготовлены в виде тонких стержней, то динамический модуль упругости материала равен:

$$E_d = 4l\rho f_{np}^2, \quad (3.3)$$

где  $l$  – длина стержня;  $f_{np}$  – резонансная частота продольных колебаний в материале.

Материалы, находящиеся под действием внешних сил, способны к уменьшению внутренних напряжений без изменения линейных размеров. Это явление объясняется *релаксацией* – постепенным рассеиванием упругой энергии деформированного под нагрузкой материала (рис. 3.3) и переходом его в теплоту.

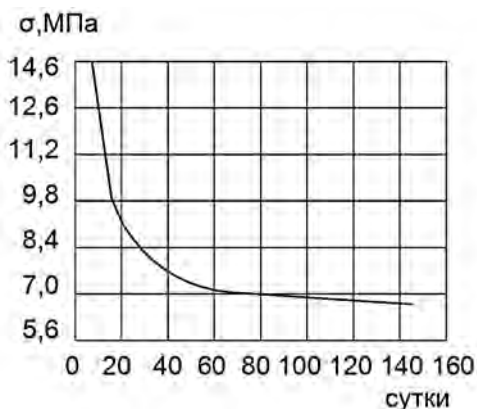


**Рис. 3.3.** Релаксация напряжений в бетоне при постоянной деформации  $360 \cdot 10^{-6}$

Релаксацией объясняют-ся принципиальные отличия механических свойств и поведения под нагрузкой твердых и жидких тел. Для твердых тел *период релаксации*, на протяжении которого упругое напряжение падает до определенного значения, очень большой, а для жидкостей – наоборот. Период релаксации выражают отношением вязкости тела к модулю упругости. Под *вязкостью* жидких тел понимают сопротивление

их вытеканию, а твердых – способность поглощать механическую энергию при их деформировании.

Период релаксации определяет длительность релаксационных процессов, в результате которых достигнутое значение напряжения уменьшается без изменения показателя деформации в  $\epsilon = 2,718$  раз.

Кроме периода релаксации, в расчетах используют *коэффициент релаксации*, показывающий уровень падения напряжения за определенный период:

$$\varphi = \sigma_{\tau} / \sigma_0, \quad (3.4)$$

где  $\sigma_{\tau}$  – напряжение в момент времени  $\tau$  при постоянной деформации;  $\sigma_0$  – начальное напряжение.

Если длительность действия деформирующей силы на жидкость значительно меньше периода релаксации, то жидкость ведет себя как упругое твердое тело. Можно было бы, например, смело ходить по воде, если бы длительность каждого шага не превышала  $10^{-13}$  с, что соответствует периоду релаксации для воды.

Для вязких жидкостей (например, асфальтов) период релаксации растет при снижении температуры. Поэтому зимой асфальт ведет себя как достаточно твердое тело, а летом, когда его вязкость существенно снижается, уже под действием силы тяжести в течение короткого времени на нем остаются следы, обусловленные возникновением остаточных деформаций. Как вязкая жидкость может вести



себя оконное стекло. При значительном повышении температуры вязкость стекла уменьшается настолько, что она становится соизмеримой с вязкостью жидкостей. В то же время при обычных температурах стекло ведет себя при нагрузках как упругое тело вплоть до момента разогрева.

Вследствие различий кристаллического строения различные материалы имеют и разные периоды релаксации. При релаксации изменение структуры приводит к преобразованию упругих деформаций в пластичные при сохранении их суммарных значений.

*Пластичность* – свойство материалов обратное упругости. Оно характеризует их способность под влиянием нагрузки изменять без разрушения форму и размеры и сохранять их после снятия нагрузки.

Пластичность – важнейшее свойство, определяющее технологичность процесса формования материалов. Характерными примерами пластичных материалов являются высококонцентрированные суспензии извести, цемента, гипса и ряда других высокодисперсных веществ в воде. Пластичность суспензий многих минеральных веществ тесно связана со свойствами, которые проявляют тонкие пленки воды на поверхности частиц дисперсной фазы.

Пластические деформации кристаллических материалов под воздействием механических усилий обусловлены перемещением дислокаций – линейных дефектов кристаллов. Форма кристаллов при этом изменяется, удлиняясь в определенном направлении.

С повышением температуры пластичность материалов возрастает. Растет она также с уменьшением скорости деформирования, с переходом от ковалентных к металлическим связям.

Материалы, как правило, редко проявляют ярко выраженные упругие, вязкие или пластические свойства от момента нагружения до их разрушения.

Для многих материалов под нагрузкой имеет место сложное сочетание упругих и вязко-пластических свойств.

По мере нагружения для пластических материалов наступает стадия, когда пластические деформации продолжают развиваться, несмотря на практически постоянное напряжение. Наименьшее напряжение, при котором материал деформируется без дальнейшего заметного роста нагрузки, называется *пределом текучести*. Теку-

часть – важная особенность структурированных дисперсных систем (цементного теста, бетонной смеси, битумов и др.).

Для твердых материалов важным механическим свойством является *ползучесть* – нарастание со временем деформаций при действии постоянной нагрузки (рис. 3.4). Деформации ползучести материалов во многих случаях нежелательны, поскольку они могут вызывать, например, повышенные прогибы конструкций, что учитывают при их проектировании.



**Рис. 3.4.** Виды деформаций бетона  $\varepsilon$ , зависящие от времени  $\tau$ , при действии постоянной нагрузки

Отличие между ползучестью и релаксацией напряжений заключается в том, что при ползучести изменяются деформации, а напряжения или нагрузки постоянны, тогда как при релаксации уменьшаются напряжения, а суммарная деформация остается постоянной. При этом решающее значение имеет длительность нагружения материала. Ползучесть может протекать одновременно с релаксацией. Она характеризуется

*пределом ползучести* – показателем максимальных длительно действующих напряжений, при которых ее скорость приближается к нулю (в практических измерениях не превышает некоторых допустимых значений).

Деформации ползучести сопровождаются изменениями структуры материалов – измельчаются слагающие их зерна, перераспределяются примеси, происходит образование и рост новых зерен, выделение новых фаз. В результате в материалах накапливаются дефекты в виде пор и трещин. Скорость ползучести резко уменьшается со снижением температуры и напряжения. Для большинства ма-

териалов (за исключением бетонов, грунтов, некоторых металлов) при обычной температуре практически ползучесть не характерна.

Механизм ползучести сложен. Для большей части материалов он связан с перемещением дислокаций, диффузионными перемещениями атомов и вязкой текучестью.

*Усадка* – изменение линейных размеров и объема материалов, обусловленная изменением, главным образом, их влагосодержания, а также пористости. Типовая кривая сушки материалов имеет два периода – постоянной скорости, которая соответствует удалению влаги из макропор и макрокапилляров, и падающей скорости, соответствующей удалению влаги из переходных микрокапилляров. Некоторые материалы, такие как глина, дают усадку в период постоянной скорости сушки, усадка прекращается при достижении некоторого критического уровня влажности. Другие материалы (древесина, цементный камень и др.) дают усадку только в период падающей скорости сушки, т.е. после достижения уровня критической влажности.

При сравнительно небольшом градиенте влагосодержания внутри материала изменение его линейных размеров ( $l$ ) при изменении влагосодержания  $\omega$  описывают линейной зависимостью:

$$l = l_0(1 + \beta_t \omega), \quad (3.5)$$

где  $l_0$  – размер абсолютно сухого образца;  $\beta_t$  – коэффициент, характеризующий интенсивность усадки при данной температуре  $t$ .

При неравномерном распределении влагосодержания и температуры в материале развивается объемно-напряженное состояние, вызывающее образование и развитие трещин вплоть до полного разрушения.

Усадка часто сопровождается *короблением* материала, когда вместе с деформациями объема происходят и деформации формы. Короблению подвергаются более сухие поверхности, поэтому чтобы уменьшить его необходимо обеспечить соответствующую скорость удаления влаги со всех поверхностей материала.

Для уменьшения усадки и предотвращения трещинообразования подбирают необходимый состав материалов (например, добавляют к глине песок или другие отощители), применяют влажный режим твердения, а также специальные покрытия, замедляющие быстрое высыхание.

Усадка ряда материалов происходит не только в процессе их сушки. Для керамических материалов она происходит и в процессе обжига, для металлов и сплавов идет при кристаллизации и охлаждении.

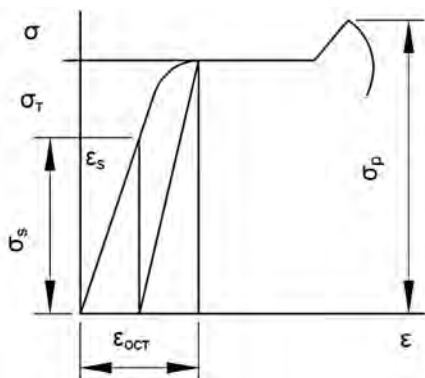


**Рис. 3.5.** Диаграмма  $\sigma - \epsilon$  при растяжении

( $\sigma_s$  — предел упругости, МПа;  
 $\sigma_p$  — предел прочности, МПа;  
 $\sigma_t$  — предел текучести, МПа;  
 $\epsilon_s$  — относительная упругая деформация;  
 $\epsilon_{ост}$  — остаточная деформация)

Важные показатели деформативных свойств материалов (пределы упругости и текучести, модуль упругости, относительное удлинение и сужение после разрыва, удельная работа деформации до разрушения и др.) определяются при испытании на растяжение (в отдельных случаях на сжатие и изгиб) построением диаграмм напряжения — деформации (рис. 3.5).

Нагружение образцов создают на испытательных машинах с механическим или гидравлическим приводом. Для измерения нагрузок используют динамометры, а для измерения деформаций — тензометрические датчики, работа ко-

торых основана на принципе превращения механических сигналов в электрические.

**Реологические свойства.** Реология — наука, изучающая явления деформации и текучести веществ. Одной из основных задач реологии является отыскание связей между напряжениями и деформациями, возникающими в структурированных системах в определенный момент времени. Для таких систем характерными являются проявление упруго-пластических свойств, связанных с формированием структуры и возможностью фазовых переходов из жидкого состояния в твердое. Примерами структурированных систем являются цементное тесто, битумные мастики, растворы полимеров и др. Частицы дисперсной фазы в таких системах находятся под воздействием межмолекулярных сил, образуя пространственную сетку.

По П.А. Ребиндеру и Н.В. Михайлову все дисперсные системы можно разделить на две основные группы – жидко- и твердообразные. К жидкообразным принадлежат истинные (*ньютоновские*) и структурированные (*неньютоновские*) жидкости. Твердообразные системы представлены как упругохрупкими, так и упруго-пластичными телами.

При перемешивании любой жидкости необходимо затратить определенное количество энергии для преодоления сил внутреннего трения или вязкости. Законы внутреннего трения впервые сформулировал И. Ньютон для однородных гомогенных жидкостей. Значения вязкости  $\eta$  для ньютоновских жидкостей не зависят от напряжения сдвига  $\tau$  и градиента скорости  $dV/dX$  потока:

$$\tau = \eta dV/dX. \quad (3.6)$$

Для структурированных дисперсных систем вязкость может изменяться в широком интервале в зависимости от напряжения сдвига и градиента скорости.

В отличие от ньютоновских структурированные жидкости характеризуются не динамической, а *эффективной* или *структурной вязкостью*. Текучесть структурированных жидкостей наступает в момент, когда напряжение сдвига  $\tau$  превышает напряжение  $\tau_0$ , которое называется пределом текучести:

$$\tau - \tau_0 = \eta dV/dX. \quad (3.7)$$

Если напряжения меньше предела текучести, то структурированная жидкость ведет себя как упругое твердое тело. Для жидкообразных структур характерно постепенное уменьшение вязкости по мере увеличения напряжения сдвига.

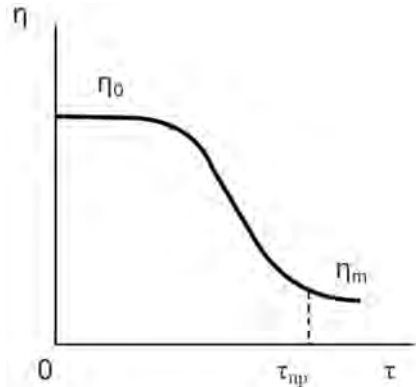


**Рис. 3.6.** Изменение структурной вязкости бетонной смеси в зависимости от напряжений сдвига:  $\tau_{нр}$  – предельное напряжения сдвига;  $\eta_0$ ,  $\eta_m$  – пластическая вязкость системы соответственно с неразрушенной и предельно разрушенной структурой

Для твердообразных тел при напряжениях ниже предела текучести проявляется ползучесть. Повышение напряжений сдвига до показателя предела текучести приводит к скачкообразному изменению вязкости, что указывает на лавинообразное разрушение структуры. При полном разрушении структуры вязкость становится минимальной и снова не зависит от напряжений сдвига. Так, для 10%-ной водной суспензии бентонитовой глины наибольшая вязкость практически неразрушенной структуры составляет  $\eta_0 = 10^6 \text{ Н с/м}^2$ , а наименьшая вязкость предельно разрушенной структуры  $\eta_m = 0,01 \text{ Н с/м}^2$ .

Твердообразное состояние тела и наличие в нем пространственной сетки выражены тем сильнее, чем больше разность между  $\eta_0$  и  $\eta_m$  и чем выше предел текучести, который характеризует прочность структуры. Для пластичных материалов предел текучести явно выражен и его превышение вызывает резкое уменьшение значения эффективной вязкости. Такие материалы, как глиняное тесто при напряжениях ниже предела текучести способны сохранять любую форму и как угодно долго. За счет уменьшения разности значений вязкости практически неразрушенной и предельно разрушенной структуры ( $\eta_0 - \eta_m$ ) и снижения предела текучести можно осуществлять непрерывный переход твердообразных тел к жидкообразным. Примером такого перехода от упруго-хрупких тел к пластичным, а затем к структурированным и реальным жидкостям с повышением температуры может быть битум.

Изменение эффективной вязкости материалов, характеризуемое степенью разрушения структуры в зависимости от интенсивности механических воздействий, во всем возможном диапазоне можно проследить с помощью реологической кривой. Например, для пластичных материалов, которые с увеличением сдвига резко изменяют эффективную вязкость (рис. 3.6), полная реологическая кривая может описываться уравнением Шведова-Бингама:

$$\tau = \tau_{\text{пр}} + \eta_m dV/dX. \quad (3.8)$$

Для многокомпонентных систем реологические уравнения достаточно сложны и поэтому для их описания используют совокупности идеализированных моделей вязких, упругих и пластичных тел.

Изучение реологических свойств материалов дает возможность научно обоснованно выбирать оптимальные параметры технологического влияния на них. Способность таких структурированных систем как бетонные смеси под влиянием механических воздействий – вибрации, встряхивания, прессования и др.. изменять реологические характеристики широко используется в технологии изготовления изделий.

Для определения реологических свойств материалов наиболее распространены приборы (рис. 3.7), основанные на:

- определении скорости истечения из капилляров, трубок и отверстий определенной формы и размера (капиллярные, щелевые и другие вискозиметры);
- измерении глубины проникновения в исследуемую среду конуса или другого тела (конический пластомер МГУ и др.);
- определении скорости погружения или всплытия шарика определенной массы и размеров (прибор А.Е. Десова и др.);
- измерении усилий выдергивания из вязкопластичных тел рифленых пластинок, стержней или цилиндров;
- измерении частоты и необходимых усилий вращения внутреннего или внешнего коаксиальных (соосных) цилиндров, между которыми находится исследуемое тело (ротационные вискозиметры).

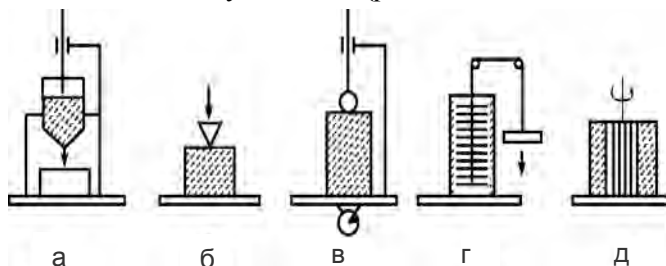


**Рис. 3.7.** Схемы приборов для определения реологических свойств структурированных жидкостей:

- а – по скорости вытекания; б – по глубине проникания конуса; в – по скорости погружения шарика; г – по силе выдергивания; д – по силе вращения коаксиальных цилиндров

**Прочностные свойства.** Завершающей стадией силового воздействия на материал является его разрушение. Способность мате-

### 3. Общие свойства строительных материалов

риалов оказывать сопротивление их разрушению называется *прочностью*.

Расчеты на прочность элементов конструкций в напряженном состоянии основываются на определенном критерии. Уже в одной из первых механических теорий прочности, предложенной Г.Галилеем, прочность материалов определяется развиваемым в нем при нагружении наибольшим нормальным напряжением. Критическое напряжение, при котором нарушается сплошность материала, называют *пределом прочности*. Его определяют воздействием на образец материала обычно статических нагрузок, возрастающих с определенной скоростью. Изменение скорости роста нагрузки и характера ее приложения (например, повторнопеременное или динамическое нагружение) приводит к изменению прочности. Она может существенно изменяться от вида напряженного состояния (растяжение, сжатие, изгиб, кручение и др.).

Предел прочности строительных материалов определяют на стандартных образцах – кубах, призмах, цилиндрах и др. (рис.3.8).

Из всех способов механических испытаний наиболее распространены растяжение, сжатие и изгиб. Их выполняют с помощью специальных разрывных машин и прессов (рис.3.9). Предел прочности при растяжении  $R_p$  и сжатии  $R_c$  определяют обычно в МПа в соответствии с системой единиц СИ ( $\text{МПа} \approx \text{МН/м}^2$ ) и рассчитывают по формуле:

$$R_{p(c)} = kP / F, \quad (3.9)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий размеры образца, его влажность и др.;  $P$  – разрушающая сила, МН;  $F$  – начальная площадь поперечного сечения образца,  $\text{м}^2$ .

Предел прочности при изгибе определяют по формуле:

$$R_{\text{изг}} = M_{\text{изг}} / W, \quad (3.10)$$

где  $M_{\text{изг}}$  – наибольший изгибающий момент, МН·м;  $W$  – момент сопротивления сечения образца,  $\text{м}^3$ .

Прочность при изгибе образца прямоугольного сечения под действием сосредоточенного усилия  $P$ , приложенного в середине пролета (рис.3.8, Па,б), равна:

$$R_{\text{изг}} = 3Pl / 2bh^2, \quad (3.11)$$

где  $l$  – расстояние между опорами, м;  $b$  и  $h$  – ширина и высота поперечного сечения образца, м.



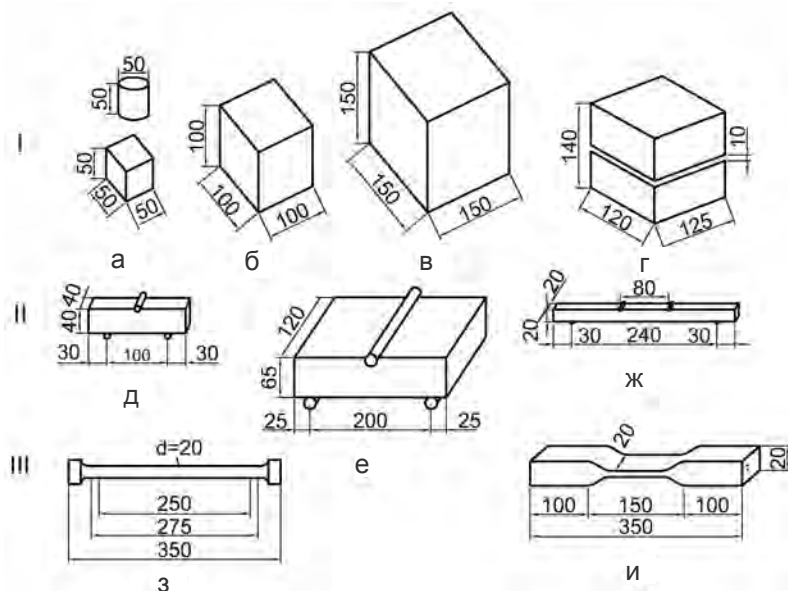


**Рис. 3.8.** Стандартные образцы для испытания материалов:

I – на сжатие: а – плотный природный камень; б – пористый природный камень; в – бетон; г – кирпич (куб склеенный из двух половинок); II – на изгиб: д – цементный раствор; е – кирпич; ж – древесина; III – на растяжение: з – сталь; и – древесина

При испытаниях такого же образца, но уже двумя силами  $P$ , расстояние между которыми  $a$  (рис. 3.8, Пв), прочность при изгибе равна:

$$R_{\text{изг}} = \frac{3P(l-a)}{2bh^2}. \quad (3.12)$$

Прочность строительных материалов – одно из основных их свойств, определяющих несущую способность и эксплуатационную надежность конструкций. С прочностью тесно связан ряд других свойств материалов, определяемых, в первую очередь, их плотностью или пористостью. Для многих материалов получены эмпирические зависимости между прочностью  $R$  и пористостью  $\Pi$  в виде формул типа:

$$R = \sigma_0(1 - \Pi)^n, \quad (3.13)$$

$$R = \sigma_0 \exp(-m\Pi), \quad (3.14)$$

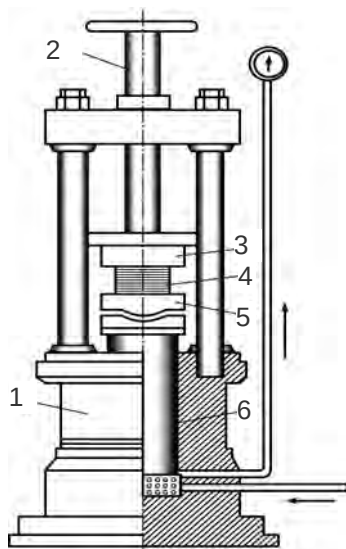


**Рис. 3.9.** Схема гидравлического пресса:  
1 – станина; 2 – винтовое приспособление; 3 – верхняя опорная плита; 4 – образец; 5 – нижняя опорная плита; 6 – поршень.

где  $n$  и  $m$  – константы, учитывающие вид материала;  $\sigma_0$  – прочность материала при нулевой пористости.

Наряду с общей пористостью (рис.3.10) на прочность материалов влияет и размер пор. Прочность мелкозернистых материалов при одинаковой пористости обычно выше, чем крупнозернистых (рис.3.11).

Прочность реальных твердых тел в сотни и тысячи раз меньше теоретической прочности. Под последней понимают прочность идеально однородного материала, характеризуемая максимальным напряжением, необходимым для разделения двух слоев атомов. Она пропорциональна модулю упругости  $E$  и поверхностной энергии твердого тела  $\sigma_n$  и обратно пропорциональна межатомному расстоянию  $l_a$ :

$$R = \sqrt{\frac{2E\sigma_n}{l_a}}. \quad (3.15)$$

Например, для металлов теоретическая прочность на разрыв равна  $10^4$ - $10^5$  МПа, в то время как экспериментально определенные значения составляют  $10^2$ - $10^3$  МПа. Такое отличие теоретической и реальной прочности материалов обусловлено тем, что последние имеют различные дефекты структуры и прежде всего микротрещины. По теории Р. Гриффитса напряжения в материале у вершины трещины равны:

$$\sigma_{max} = 2\sigma_{cp} \sqrt{\frac{l}{r}}, \quad (3.16)$$

где  $\sigma_{cp}$  – среднее напряжение в материале;  $l$  – длина трещины;  $r$  – радиус кривизны вершины трещины, равный  $(1...4) \cdot 10^{-8}$  см, т.е. нескольким атомам.

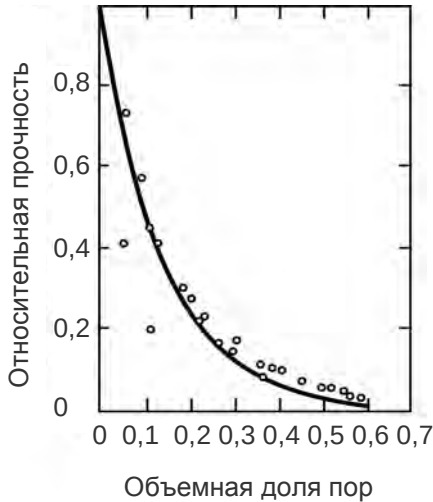


**Рис. 3.10.** Зависимость прочности материалов от пористости

ным образом, к постепенному увеличению деформаций, образованию трещин и накоплению других локальных дефектов. Различают хрупкое и пластическое разрушение материалов. Особенностью хрупкого разрушения, характерного, например, для природных камней, керамики, стекла, бетонов и др., является отсутствие при максимально возможном напряжении заметных пластических деформаций. Механические напряжения в материале не успевают релаксировать и трещины, образующиеся в плоскости, перпендикуляр-

Поскольку прочность зависит от случайного расположения в материале трещин и других дефектов структуры, она имеет статистический характер. По статистической теории прочности хрупких тел вероятность нахождения самых опасных трещин возрастает при увеличении объема образца, что учитывают при испытании, вводя в формулу предела прочности так называемый масштабный коэффициент.

Процессы разрушения материалов сводятся, глав-

$R_{ц,к}$ , МПа

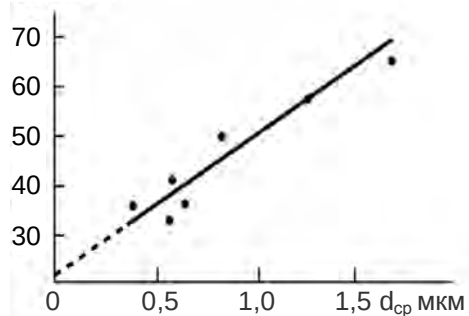


**Рис. 3.11.** Зависимость прочности цементного камня  $R_{ц,к}$  от среднего размера кристаллитов  $d_{cp}$  (по Ю.М. Баженову)

### 3. Общие свойства строительных материалов

ной действию напряжений, быстро развиваются. Хрупкому разрушению способствуют циклические нагрузки (вибрационные, ударные и др.), при которых наблюдается усталость материалов, связанная с накоплением повреждений, возникновением микро-, а затем и макротрещин. Повышению хрупкости материалов способствуют также снижение температуры, увеличение скорости деформирования, воздействие поверхностно-активной среды.

Прочность материалов имеет кинетический характер, она зависит от продолжительности  $\tau$  приложения механического нагружения до разрушения. Для многих материалов зависимость между  $\tau$  и разрушающим напряжением  $\sigma$  имеет экспоненциальный характер:

$$\tau = A_0 \exp(-\alpha\sigma), \quad (3.17)$$

где  $A_0$  и  $\alpha$  – коэффициенты, зависящие от структуры материала и температуры.

Наряду с прямым определением прочности материалов разрушением образцов, для ее ускоренного определения непосредственно в конструкциях применяют неразрушающие методы, основанные на взаимосвязи прочности с другими свойствами твердых тел – скоростью распространения ультразвуковых волн, твердостью и др. (рис. 3.12).

В группу прочностных свойств относят адгезию и когезию. *Адгезией* называют сцепление (прилипание) двух разнородных твердых или жидких тел, обусловленное межатомными силами притяжения. Сцепление частиц в самом теле или между однородными по химическому составу телами называют *когезией*. Количественной мерой адгезии и когезии является работа, затраченная на разделение тел, отнесенная к единице площади контакта. В системах, где нет химических межфазовых связей, адгезия обусловлена, главным образом, Ван-дер-Ваальсовыми (межмолекулярными) силами, которые зависят от электрической природы тел и взаимодействия образуемых ими электрических полей. Чем более полярны вещества, тем больше значения электростатических сил и, соответственно, адгезионное взаимодействие.

Хорошими клеями, проявляющими в достаточной мере как когезионные, так и адгезионные свойства, являются полимеры, содержащие гидроксильные (ОН), карбоксильные (COOH), амидные (NHCO<sup>-</sup>), аминные ((NH<sub>2</sub>) и другие полярные группы.

Разрыв по контактной поверхности двух твердых тел возможен только тогда, когда адгезионные силы намного меньше сил когезионного взаимодействия, характерного для каждого из них. Часто разрыв имеет смешанный адгезионно-когезионный характер.

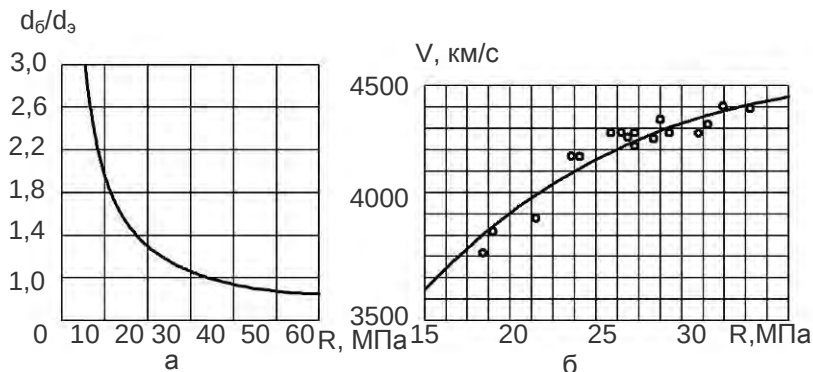


**Рис. 3.12.** Графики зависимости прочности бетона  $R$ :  
а – от отношения диаметра оттиска стального шарика на бетоне  $d_6$  и на эталоне  $d_3$ ; б – от скорости прохождения ультразвуковых волн  $V$

В случае контакта твердого и жидкого материалов адгезионное взаимодействие становится значительно сильнее, чем при контакте двух твердых тел, особенно при условии хорошего смачивания жидкостью поверхности твердого тела. Полнота смачивания зависит от вязкости жидкой фазы, давления и свойств твердой поверхности. Смачиванию способствует наличие углублений в твердой поверхности, особенно конической или призматической формы.

Адгезия имеет особенно большое значение при склеивании, нанесении покрытий, а также сваривании, лужении и пайке материалов.

К прочностным свойствам материалов можно отнести *твёрдость* или прочность при вдавливании. Как и другие виды прочности, твердость – структурно-чувствительное свойство, зависящее от вида обработки поверхности, температуры и других факторов. Твердость измеряется вдавливанием в поверхность испытываемого материала или перемещением по ней под нагрузкой наконечников, имеющих сферическую, коническую или другую форму (рис. 3.13).

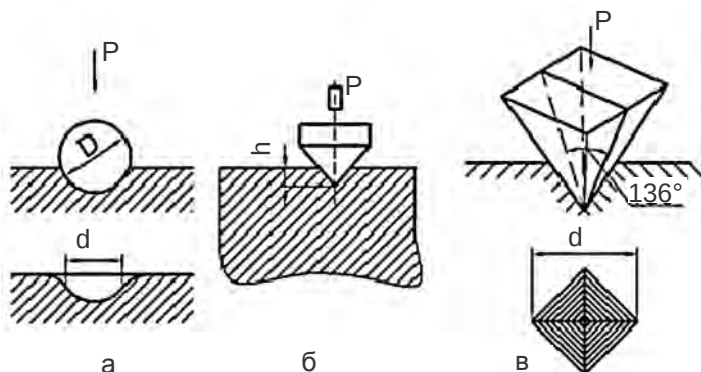


**Рис. 3.13.** Схемы определения твердости по:  
а – Бринеллю; б – Роквеллу; в – Виккерсу

Мерой или числом твердости при этом является отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка. По методу Бринелля твердость (HB) находят по формуле:

$$HB = \frac{2P}{\pi D \left( d - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \quad (3.18)$$

где  $P$  – нагрузка;  $D$  – диаметр сферического индентора (шарика диаметром 10; 5 или 2,5 мм);  $d$  – диаметр отпечатка.

При определении твердости по Роквеллу (HR) в поверхность материала вдавливают алмазный конус с углом у вершины  $120^\circ$  (шкалы А и С) или стальной шарик диаметром 1,587 мм (шкала В). Твердость по Роквеллу – безразмерная величина, которая зависит от глубины проникновения индентора в материал при фиксированной величине нагрузки.

Твердость по Виккерсу (HV) определяется вдавливанием под действием нагрузки  $P$  в образец алмазного наконечника в виде правильной четырехгранной алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями у вершины  $136^\circ$  и измерением диагонали отпечатка  $d$ :

$$HV = 0,189P / d^2. \quad (3.19)$$

Для тонких покрытий при изучении отдельных структурных составляющих материалов и в ряде других случаев определяют *мик-*

*ротвердость*, вдавливая алмазную пирамидку на участке, площадь которого на несколько порядков меньше, чем в предыдущих методах испытаний по определению твердости материала. Число твердости Н определяют аналогично методу Виккерса.

Наряду с методами измерения твердости с помощью статического нагружения применяют динамические методы, когда индентор передает на поверхность ударную нагрузку, падая с определенной высоты.

Для ориентировочного определения твердости горных пород и других хрупких материалов используют метод Ф. Мооса, который заключается в царапании поверхности испытываемого материала с помощью эталонных минералов. При этом твердость измеряется в условных единицах, соответствующих номеру минерала по десятибалльной шкале Мооса: тальк – 1, гипс – 2, кальцит – 3, флюорит – 4, апатит – 5, ортоклаз – 6, кварц – 7, топаз – 8, корунд – 9, алмаз – 10.

Твердость ряда однородных материалов пропорциональна их прочности на растяжение и сжатие, что представляет возможность использовать соответствующие зависимости для неразрушающих методов механических испытаний.

Для большинства строительных материалов (за исключением пластмасс) с твердостью связано их сопротивление истирающим воздействиям. *Истираемость* материалов измеряют по уменьшению массы образцов  $\Delta m$  после проведения опыта, отнесенному к площади истирания  $F$ :

$$И = \Delta m / F. \quad (3.20)$$

Высокую стойкость к истиранию имеют некоторые горные породы, каменное литье, керамические материалы, пластмассы. Например, истираемость кварцита составляет 0,06-0,12 г/см<sup>2</sup>, керамических плиток для полов – 0,08 г/см<sup>2</sup>, однослойного поливинилхлоридного линолеума – 0,06 г/см<sup>2</sup>. Для некоторых дорожно-строительных материалов устанавливают марки по истираемости, связанные с максимально допустимыми потерями их массы в %. Так, для щебня и гравия марок по истираемости И1, И2, И3 и И4, потеря массы составляет соответственно до 25, 25-35, 35-45 и 45-60%. Истираемость определяют на специальных машинах – кругах истирания или полочных барабанах, где материал разрушается в результате интенсивного трения.

### 3. Общие свойства строительных материалов

Сопротивление материалов разрушению при приложении ударных нагрузок называют *ударной прочностью*. Для испытания материалов на удар применяют копры. Ударную прочность характеризуют величиной работы, затраченной на разрушение материала, отнесенной к единице его объема. Работа разрушения надрезанного образца при испытании ударным прибором на маятниковом копре характеризует *ударную вязкость*. Сопротивление удару важно для материалов, используемых при устройстве фундаментов машин, полов промышленных зданий, дорожных покрытий. Ударная вязкость имеет практическое значение при оценке качества металлов, асбестоцементных изделий и др.

Сопротивление материала одновременному действию удара и истиранию характеризует *износостойкость*. Ее оценивают по потерям массы образца материала во вращающихся барабанах, заполненных стальными шарами.

Изменение механических свойств материалов при длительном действии циклически изменяющихся во времени напряжений называется *усталостью*.

По мере накопления усталостных повреждений в материалах образуются микротрещины в структурных составляющих и на их границах, которые перерастают в макротрещины и приводят к разрушению.

$(R_6^N / R_6)$  100%

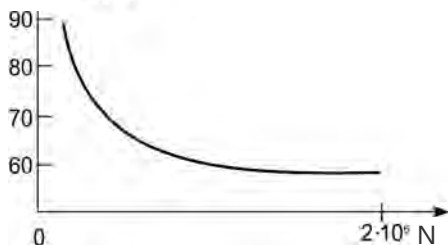


**Рис. 13.14.** Характер зависимости относительного предела выносливости бетона от количества циклов нагружения  $N$ :  $R_6^N, R_6$  — соответственно прочность бетона через  $N$  циклов и начальная прочность

Усталость материалов существенно ускоряется при активном воздействии среды (повышенные температуры, коррозия). Усталость материалов приводит к изменению их прочности, твердости, модуля упругости, электрического и магнитного сопротивления, плотности.

Сопротивление материалов усталости обычно характеризуют кривой усталости (выносливости), описывающей зависимость между ними относительной прочностью или деформацией



цией и числом циклов до возникновения макротрещин или до окончательного разрушения (рис. 13.14). Усталостным разрушениям лучше сопротивляются материалы с повышенной прочностью, пластичностью и вязкостью. Усталостные свойства материалов с повышенной чувствительностью к концентрации напряжений сильно зависят от состояния поверхности и в связи с этим от технологии их обработки. Сопротивление усталости, например, стали, увеличивают легированием, использованием электропеплава, снижающего содержание вредных примесей, термомеханическим упрочнением. Высокое сопротивление усталости материалов достигается выбором оптимального состава и структуры, защитными покрытиями.

### 3.2. Физические свойства

К физическим относят свойства материалов, характеризующие параметры их состояния и отношение к действию физических факторов: воды, температуры, электрического тока, магнитного поля и др.

**Параметры состояния.** Важнейшими физическими параметрами состояния материалов являются плотность и пористость.

*Плотность* определяется отношением массы материала к его объему. Для строительных материалов различают истинную  $\rho$  и среднюю плотность  $\rho_0$ . *Истинная плотность* (или просто плотность) характеризует массу материала в единице объема принятого в абсолютно плотном состоянии  $V_a$ , а *средняя плотность* – с учетом имеющихся в нем пор и пустот –  $V$ :

$$\rho = m / V_a, \quad (3.21)$$

$$\rho_0 = m / V. \quad (3.22)$$

Для сыпучих материалов наряду со средней плотностью зерен определяют *насыпную плотность*, учитывающую межзерновую пустотность.

Истинная плотность большинства неорганических материалов составляет 2200-3300 кг/м<sup>3</sup>, стали – 7600-7900 кг/м<sup>3</sup>, сплавов алюминия – 2600-2900 кг/м<sup>3</sup>, полиэтилена – 910-970 кг/м<sup>3</sup>. Средняя плотность материалов изменяется в широком диапазоне (табл. 3.2), например, для легчайших пористых пластмасс она составляет 10-20 кг/м<sup>3</sup>, а для наиболее плотных – 2000 кг/м<sup>3</sup> и более.

### 3. Общие свойства строительных материалов

Плотность материалов растет при увеличении давления и уменьшается с повышением температуры. Исключение составляет вода, имеющая максимальную плотность при 4°C. При фазовых превращениях плотность материалов изменяется скачкообразно, увеличиваясь в процессе перехода из жидкого состояния в твердое. Вода, а также чугун и ряд других материалов при затвердевании становятся менее плотными. Плотность материалов определяют пикнометрическим методом, гидростатическим взвешиванием и др.

Для строительных материалов в ряде случаев определяют также *относительную плотность*  $\rho_{от}$  как отношение объема вещества в образце к полному его объему или отношение его средней и истинной плотностей:

$$\rho_{от} = \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right) \cdot 100\% . \quad (3.23)$$

Таблица 3.2

Плотность и пористость материалов

| Материал       | Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup> | Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> | Общая пористость, % |
|----------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|
| Гранит         | 2650...2700                           | 2600...2700                          | 0...2               |
| Известняк      | 2700                                  | 1300...2700                          | 11...13             |
| Бетон тяжелый  | 2600                                  | 1800...2400                          | 8...31              |
| Пенобетон      | 2600                                  | 300...600                            | 77...85             |
| Древесина:     |                                       |                                      |                     |
| сосна          | 1500                                  | 400...500                            | 67...73             |
| дуб            | 1500                                  | 610...750                            | 50...60             |
| Стекло оконное | 2400...2650                           | 2450...2650                          | —                   |
| Сталь          | 7800...7850                           | 7800...7850                          | —                   |

С плотностью материалов неразрывно связана их *пористость*. Общую пористость, %, можно определить по формуле:

$$\Pi = \left( 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) \cdot 100\% . \quad (3.24)$$

Для сыпучих материалов общая пористость характеризуется степенью заполнения порами отдельных зерен и объемом межзерновых пустот.

Пористость материалов существенно влияет на ряд их свойств и, в частности, тепло- и электропроводность, прочность, проницаемость.

Различают открытую и закрытую пористость. Открытую (кажущуюся) пористость можно определять по объемному водонасыщению материала. Для более точного определения открытой пористости применяют методы, основанные на вдавливании ртути в поры, пропитывании образцов жидкостью с последующим ее вытеснением, отсасывании воздуха из пор и др. Закрытую пористость определяют с помощью микроскопа, малоуглового рассеивания рентгеновских лучей и др.

Регулирование пористости – эффективное технологическое средство целенаправленного изменения свойств материалов.

При сравнительно небольших значениях пористости ( $P \leq 10\%$ ) большинство показателей физических свойств изменяется линейно в случае ее увеличения и может быть рассчитано по формуле:

$$\gamma = \gamma_0(1 - KP), \quad (3.25)$$

где  $\gamma$  – показатель свойства пористого материала;  $\gamma_0$  – показатель свойства материала без пор;  $K$  – коэффициент, зависящий от особенностей структуры материала и конкретного свойства (например, для электро- и теплопроводности среднее значение  $K$  составляет 1,5, прочности – 3-6).

В широком интервале пористость связана с показателями физико-механических свойств зависимостью:

$$\gamma = \gamma_0(1 - P)^K. \quad (3.26)$$

Влияние пор на свойства материалов связано не только с их относительным объемом, но и зависит от их размера, формы, открытого или закрытого характера. Например, при одинаковой общей пористости материалы с большим объемом закрытых пор более морозостойки. Увеличение объема открытых пор способствует повышению звукопоглощаемости материалов. Открытая пористость увеличивает химическую активность материалов и снижает их коррозионную стойкость. Строительно-технические свойства материалов,

### 3. Общие свойства строительных материалов

как правило, улучшаются при мелкопористом строении и равномерном распределении пор.

Для дисперсных материалов важной характеристикой является *удельная поверхность* – площадь поверхности, отнесенная к единице объема или массы. Величина удельной поверхности  $S_{уд}$  обратно пропорциональна размеру частиц. Для частиц шарообразной формы она равна:

$$S_{уд} = 3 / r, \quad (3.27)$$

где  $r$  – радиус частицы.

С увеличением удельной поверхности материалов растет их поверхностная энергия и реакционная способность. Удельную поверхность дисперсных материалов измеряют, определяя сопротивление прохождению воздуха через слой порошка, а также адсорбционным и другими методами.

Энергетической характеристикой состояния материалов является *поверхностная энергия* – избыток энергии поверхностного слоя на границе раздела двух фаз. Например, значение поверхностной энергии на границе с воздухом в частности для меди составляет 1,43 Дж/м<sup>2</sup> (при 1100°C), силикатного стекла – 0,3 Дж/м<sup>2</sup> (при 650°C). С увеличением температуры поверхностная энергия снижается, она в значительной мере зависит от состава материала, вида и концентрации примесей. Значение поверхностной энергии материалов прямо связано с величиной *поверхностного натяжения* ( $\sigma$ ), характеризующего работу перехода атомов из внутренних слоев на поверхность при образовании 1 см<sup>2</sup> новой поверхности. Поверхностное натяжение определяют для жидкостей с помощью достаточно разработанных экспериментальных методов. О величине поверхностной энергии твердых тел судят с помощью расчетных методов и, косвенно, измерением некоторых механических характеристик.

В соответствии с уравнением Гиббса-Гельмгольца свободная удельная поверхностная энергия определяется из уравнения:

$$I = \sigma - T d\sigma / dT, \quad (3.28)$$

где  $T d\sigma / dT$  – теплота образования единицы поверхности.

Эффективным средством увеличения поверхностной энергии материалов является их механо-химическая обработка.

**Гидрофизические свойства.** Эта группа свойств материалов отражает их отношение к воде. Физическое взаимодействие воды (как и других жидкостей) с поверхностью твердых тел проявляется в

смачивании, обусловленном силами молекулярного взаимодействия. Смачивают твердую поверхность лишь те вещества, которые уменьшают поверхностное натяжение твердого тела на границе раздела с воздухом.

Способность твердого тела смачиваться определяется, прежде всего, химической природой его поверхности и природой смачивающей жидкости. Водой смачиваются *гидрофильные* – обычно высокополярные вещества с ионной или полярной связью, т.е. большинство строительных материалов, таких как бетон, керамика, древесина и др. Для *гидрофобных* материалов – битумов, дегтей, синтетических полимеров и др., характерна низкая полярность молекулярных сил, действующих на границе с воздушной средой. Такие материалы смачиваются неполярными жидкостями, например, жидкими углеводородами, т.е. веществами, родственными им по химическому строению. Мерой смачиваемости является краевой угол  $\theta$ , образуемый каплей жидкости на твердой поверхности. Для гидрофильных материалов угол  $\theta$  острый, для гидрофобных – тупой (рис. 3.15).

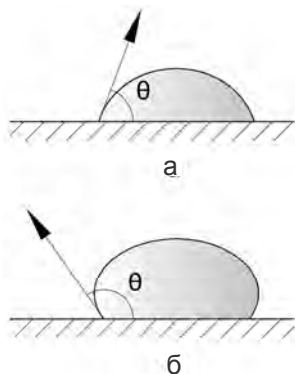


**Рис. 3.15.** Положение капли воды на поверхности:  
а – гидрофильной;  
б – гидрофобной

Степень гидрофобности материалов можно существенно изменять обработкой их поверхностно-активными веществами (ПАВ). Замечательным примером гидрофобизации в технологии строительных материалов является получение гидрофобного цемента помолом цементного клинкера с введением добавок гидрофобизирующих ПАВ – жирных кислот и их солей. Получила распространение также поверхностная гидрофобизация материалов кремнийорганическими жидкостями.

Пористые гидрофильные материалы гигроскопичны, т.е. способны поглощать влагу из окружающего воздуха.

*Гигроскопичность* обусловлена адсорбцией воды на поверхности материала и ее конденсацией в микрокапиллярах. Процесс гигроскопического увлажнения является обратимым и поглощение влаги из воздуха идет до установления равновесия. Гигроскопическая

### 3. Общие свойства строительных материалов

---

влажность материалов зависит от многих факторов. Она увеличивается с повышением относительной влажности и снижением температуры воздуха, уменьшением воздушных тепловых потоков, ростом удельной поверхности материалов. Она зависит также от химико-минералогического состава материалов и их растворимости.

Гигроскопическая влажность в зависимости от вида материалов изменяется в широких пределах – для большинства неорганических материалов в диапазоне 1-3%, древесины – 12-18%. Гигроскопическое увлажнение обычно ухудшает качество строительных материалов: снижает активность цемента, приводит к набуханию древесины и снижению ее прочности, увеличению теплопроводности теплоизоляционных материалов и пр.

При непосредственном контакте материалов с водой они увлажняются в результате капиллярного всасывания, диффузии и гидростатического заполнения водой открытых пор.

*Капиллярное всасывание* вызывается силами поверхностного натяжения, возникающими на границе раздела двух фаз – твердой и жидкой.

С явлением капиллярного всасывания связан подъем воды в бетоне, кирпичной кладке, который может достигать значительной высоты. Капиллярное всасывание снижает стойкость к химической коррозии и морозостойкость строительных материалов. При капиллярном всасывании минерализованных вод в порах природных и искусственных каменных материалов отлагаются соли (*солевая коррозия*) при одновременном испарении из них воды. Такой процесс сопровождается сильным давлением кристаллов на стенки капилляров, что вызывает разрушающие напряжения. Соответствующая капиллярному давлению высота подъема воды  $h$  может быть найдена из уравнения:

$$h = \frac{2\sigma \cos \varphi}{rg\rho_{\text{в}}}, \quad (3.29)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение воды на границе с воздухом (при 20°C равное 0,0728 Н/м);  $\varphi$  – краевой угол смачивания;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды;  $r$  – радиус капилляров.

Из уравнения (3.29) следует, что у гидрофобных материалов, для которых  $\varphi > 90^\circ$ , функция  $\cos \varphi$  принимает отрицательное значение и капиллярного всасывания не будет наблюдаться. При этом возникающее капиллярное давление препятствует проникновению воды в поры. Например, гидрофобизованный материал с диаметром пор около 10 мкм может сопротивляться гидростатическому давлению, равному примерно 0,03 МПа.

Возможность увлажнения материалов за счет капиллярного всасывания необходимо учитывать при эксплуатации зданий и сооружений. Например, для предотвращения увлажнения грунтовыми водами нижних частей зданий устраивают гидроизоляционный слой, отделяющий их от фундаментов. Капиллярное всасывание можно использовать для пропитки пористых материалов защитными составами.

*Диффузионное увлажнение* характерно для таких высокоплотных материалов как битумы и полимеры. Скорость проникновения воды в результате диффузии, например, в среде вязкого битума составляет около 1.0 мм/сут. Она существенно зависит от температуры.

Степень заполнения пор материалов водой характеризуется их *водопоглощением*. Различают водопоглощение:

- по массе  $B_m$ :

$$B_m = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100\%, \quad (3.30)$$

- по объему  $B_v$ :

$$B_v = \frac{m_1 - m}{V} \cdot 100\%. \quad (3.31)$$

где  $m_1$  – масса образца, насыщенного водой;  $m$  – масса сухого образца;  $V$  – объем сухого образца.

Из уравнений (3.30) и (3.31) следует взаимосвязь этих показателей:

$$B_v = \rho_0 B_m, \quad (3.32)$$

где  $\rho_0$  – средняя плотность материала.

Водопоглощение по объему характеризует открытую или “кажущуюся” пористость. В отличие от массового объемное водопоглощение всегда меньше 100%. Для металлов, стекла, фарфора водопоглощение (по массе) практически равно нулю, гранита – 0,5-0,7% , плотного бетона – 2-4, керамического кирпича – 8-20, ряда

### 3. Общие свойства строительных материалов

---

высокопористых теплоизоляционных материалов – более 100%. Водопоглощение связано с другими свойствами материалов – прочностью, морозостойкостью, проницаемостью и др., и при необходимости, нормируется.

*Влажность* – содержание воды в порах и на поверхности материала. Определяют в процентах по массе или объему. Различают абсолютную и относительную влажность. *Абсолютную влажность* определяют как отношение массы влаги, которая находится в материале, к массе сухого материала, *относительную влажность* – к массе материала во влажном состоянии.

Материалы, находясь на воздухе, сохраняют свою влажность только при условии определенной равновесной относительной влажности окружающей среды. Если влажность окружающей среды, ниже равновесной, материал начинает отдавать влагу (высушивается). Скорость влагоотдачи зависит от разности между влажностью материала и относительной влажностью воздуха, скорости нагрева и движения воздуха, пористости, величины частиц и природы материала.

Влагоотдача характеризуется скоростью выделения влаги, т.е. количеством воды, теряемой стандартным образом в течение суток при относительной влажности воздуха 60% и температуре 20°C, и выражается в процентах от массы образца. Равновесное состояние между влажностью материала и воздуха называется *воздушно-сухим состоянием* материала. Равновесная влажность древесины, соответствующая воздушно-сыхому состоянию, – 12-18%, стеновых материалов – 5-7%.

В лабораторных условиях можно высушить материал до полного удаления гигроскопической влаги. В таком состоянии материал называется абсолютно сухим.

Для ряда материалов, применяемых при строительстве плотин, резервуаров, коллекторов и других напорных сооружений, важным свойством является *водопроницаемость* – способность пропускать воду под давлением. Водопроницаемость материалов характеризуется *коэффициентом фильтрации*  $K_f$ , определяющим количество воды  $V_v$ , просочившейся в течение определенного времени  $\tau$  через площадь  $S$  испытываемого материала толщиной  $\delta$  при перепаде гидростатического давления  $\Delta P$ :



$$K_{\phi} = \frac{V_{\phi} \delta}{S \Delta P \tau}. \quad (3.33)$$

Наряду с коэффициентом фильтрации возможно использование и других показателей водопроницаемости (водонепроницаемости): предельного давления, которое выдерживает материал, или максимально возможной длительности при заданном давлении без появления признаков фильтрации воды.

Водопроницаемость материалов определяется, прежде всего, наличием путей фильтрации, открытыми сообщающимися порами и трещинами. Уменьшение водопроницаемости, как и проницаемости по отношению к другим флюидам достигается регулированием пористой структуры материалов, их гидрофобизацией, кольматацией (закупоркой) пор, введением в их состав некоторых добавок или пропиткой, а также нанесением защитных покрытий.

С особенностями пористой структуры связана также газопроницаемость (паропроницаемость) материалов.

*Газопроницаемость* – способность материалов пропускать газы через поры и трещины при возникновении на их поверхности разности давлений. Характеризуется коэффициентом газо-, паропроницаемости, показывающим массу газа или пара, прошедшего через стенку с определенной площадью поверхности  $1 \text{ м}^2$  и толщиной  $1 \text{ м}$  за один час при разности давлений  $1 \text{ Па}$ . При определении коэффициента газопроницаемости объем проходящего газа приводят к нормальным условиям.

Стеновой материал должен обладать определенной проницаемостью (стена должна “дышать”), при которой имеет место естественная вентиляция, что особенно важно для жилых зданий, в которых отсутствует кондиционирование воздуха. Стены жилых зданий, больниц и т.п. не рекомендуется отделывать материалами, задерживающими водяной пар. С внутренней стороны стены и покрытия влажных производственных помещений защищаются от проникновения в них водяного пара. Попадая в холодную часть ограждений пар конденсируется и создаются условия, способствующие быстрому разрушению материалов наружных ограждающих конструкций при действии мороза.

Газопаронепроницаемые материалы располагаются с той стороны ограждений, с которой содержание водяного пара больше.

### 3. Общие свойства строительных материалов

Газопроницаемость в большой мере зависит от плотности и пористости материалов (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Относительные значения газо- и паропроницаемости  
некоторых материалов

| Материал               | Плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> | Пористость,<br>% | Относительное значение      |                        |
|------------------------|---------------------------------|------------------|-----------------------------|------------------------|
|                        |                                 |                  | паропро-<br>ницаемос-<br>ти | газопрони-<br>цаемости |
| Кирпич<br>керамический | 1800                            | 31               | 1                           | 1                      |
| Легкий бетон           | 1800                            | 31               | 0,8                         | 0,9                    |
| Кирпич<br>трепельный   | 1100                            | 58               | 2,2                         | 4,2                    |
| Известняк              | 2000                            | 23               | 0,7                         | 1,2                    |
| Бетон на гравии        | 2200                            | 15               | 0,25                        | 0,1                    |

При увлажнении материалов их механические свойства могут существенно изменяться за счет создания адсорбционно-активной среды и расклинивающего действия тонких пленок воды (эффект П.А. Ребиндера), растворения контактов срастания кристаллов, набухания глинистых минералов и др. Способность материалов сохранять прочность в насыщенном водой состоянии – *водостойкость*, характеризуется *коэффициентом размягчения*:

$$K_p = R_n / R_c, \quad (3.34)$$

где  $R_n$  – прочность образца в насыщенном водой состоянии;  $R_c$  – прочность сухого образца.

Коэффициент размягчения может изменяться практически от нуля (воздушная известь, размокающая глина) до единицы (металлы, полимеры). Для гидравлических вяжущих и бетонов, твердеющих в водной среде, при отсутствии коррозионного воздействия величина  $K_p$  может быть больше единицы.

К водостойким относятся материалы с коэффициентом размягчения не менее 0,8. Повышение водостойкости обеспечивается понижением растворимости и пористости материалов, их гидрофобизацией, пропиткой и покрытием водостойкими составами.

Разрушающее воздействие воды особенно велико при попеременном ее замораживании и оттаивания в порах материала. Оно

объясняется развитием значительных внутренних напряжений в результате циклически повторяющегося в заполненных водой порах процесса кристаллизации льда, сопровождающегося увеличением объема. По мере чередования циклов замораживания и оттаивания в материале накапливаются остаточные деформации, вызывающие разрушения усталостного типа. Разрушению бетона при циклическом замораживании и оттаивании способствуют также гидравлическое давление, создаваемое в порах материалов водой, оттесняемой льдом, и напряжения, возникающие в результате различия коэффициентов термического расширения отдельных компонентов. Интенсивность разрушения увеличивается по мере увеличения водопоглощения, объема открытых пор, понижения температуры замораживания, т.е. увеличения, в конечном счете, объема льда, образуемого в материале. На *морозостойкость*, т.е. способность материалов в увлажненном состоянии сопротивляться попеременному замораживанию и оттаиванию, влияет также характер напряженного состояния материалов.

Количественно морозостойкость материалов оценивается нормированными показателями – марками, равными числу циклов попеременного замораживания и оттаивания, которое выдерживают образцы при допустимом снижении их прочности (в пределах 5-25%) или массы (не более 5%). Морозостойкость материалов изменяется в широком диапазоне в зависимости от вида материала, его состава, характера пористости и т.д. Например, для кирпича установлены марки по морозостойкости F15-F50, для тяжелого бетона – F50-F1000.

Морозостойкость характеризуют также *коэффициентом морозостойкости*:

$$K_F = R_2 / R_1, \quad (3.35)$$

где  $R_2$  и  $R_1$  – пределы прочности при сжатии образцов материала в водонасыщенном состоянии соответственно подвергнутых и не прошедших испытание.

Испытание водонасыщенных образцов на морозостойкость проводят в морозильных камерах последовательным замораживанием и оттаиванием образцов. Образование льда в наиболее характерных капиллярных порах материалов происходит при температуре от  $-15$  до  $-20^\circ\text{C}$ . Для ускоренного испытания на морозостойкость образцы испытывают в солевых растворах и при более низких температурах. Показателем деструктивных изменений в материале, который ис-

### 3. Общие свойства строительных материалов

пользуют также при ускоренных испытаниях, являются остаточные деформации и видимые разрушения в виде шелушения поверхности образцов, появления сетки микротрещин и др. (рис. 3.16).

Увеличение морозостойкости материалов достигается, прежде всего, уменьшением открытой доступной для воды пористости, а также увеличением объема закрытых равномерно распределенных воздушных пор, размером менее 0,5 мм при оптимальном расстоянии между ними. Такие поры служат “резервными” емкостями, куда отжимается замерзающая вода, что снижает возникающие напряжения. На морозостойкость положительно влияют повышение водостойкости материалов и их прочности на растяжение.

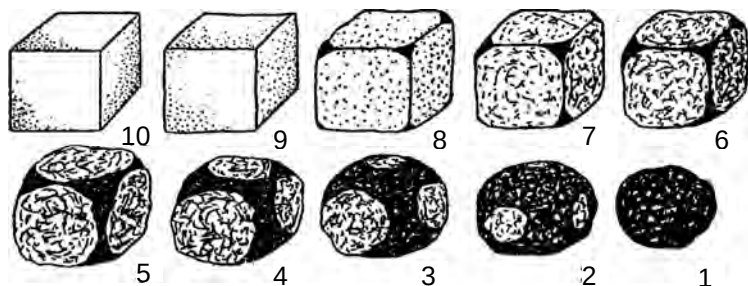


**Рис. 3.16.** Оценка состояния образцов при испытании на морозостойкость по десятибалльной шкале

**Теплофизические свойства.** В данную группу входит ряд свойств, характеризующих отношение материалов к тепловому воздействию.

Мера тепловой энергии, необходимая для повышения температуры материалов на один градус, называется *теплоемкостью*. Ее определяют экспериментально с использованием калориметров на основе уравнения теплового баланса системы. Теплоемкость зависит от химического состава и строения материалов, их температуры и влажности. Удельная теплоемкость, т.е. теплоемкость единицы массы или объема вещества, природных и искусственных каменных материалов изменяется в широких пределах (табл. 3.4, рис. 3.17).

Для органических материалов теплоемкость значительно выше, чем для неорганических.

Теплоемкость ( $C$ ) практически линейно растет с увеличением температуры:

$$C = C_0(1 + \alpha T), \quad (3.36)$$

где  $C_0$  – удельная теплоемкость при  $0^\circ\text{C}$ ;  $T$  – абсолютная температура;  $\alpha$  – константа.

Таблица 3.4

Удельная теплоемкость для некоторых строительных материалов

| Материал            | Массовая теплоемкость кДж/(кг·°C) | Объемная теплоемкость кДж/(дм <sup>3</sup> ·°C) |
|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|
| Асфальт             | 0,92                              | 1,2                                             |
| Кирпич керамический | 0,84                              | 1,344                                           |
| Кирпич силикатный   | 1                                 | 1,7                                             |
| Бетон тяжелый       | 0,88                              | 1,7                                             |
| Стекло оконное      | 0,84                              | 2,1                                             |
| Гранит              | 0,84                              | 2,1                                             |
| Гипс                | 1,09                              | 2,507                                           |
| песок кварцевый     | 0,835                             | 1,2                                             |
| Сталь               | 0,47                              | 3,713                                           |
| Древесина           | 1,7                               | 1                                               |

Для материалов, нагреваемых до высоких температур, используют нелинейную зависимость:

$$C = a + bT + cT^2. \quad (3.37)$$

Начиная с т.н. температуры Дебая, соответствующей максимально возможной частоте колебаний атомов в узлах кристаллической решетки без ее разрушения (0,2-0,5 температуры плавления), повышение теплоемкости с увеличением температуры становится незначительным.

Теплоемкость материалов учитывают при конструировании ограждающих конструкций, в том числе теплостойких (стены, перекрытия, печи, сушилки и др.), расчете термосного режима твердения бетона и др.

При наличии разности температур в материалах происходит передача теплоты в направлении от менее нагретых к более нагретым участкам, обусловленная колебательным движением частиц (керамика, природные камни, стекло) или движением свободных электронов (металлы). Это явление получило название *теплопроводности*. Для минеральных кристаллических материалов теплопроводность уменьшается с повышением температуры, а для аморфных материалов характерна обратная зависимость. С повышением температуры уменьшается также теплопроводность металлов.

### 3. Общие свойства строительных материалов

Мерой теплопроводности материала является количество теплоты, передаваемое за единицу времени через единицу его поверхности при градиенте температур в  $1^{\circ}\text{C}/\text{м}$ , получившее название коэффициента теплопроводности  $\lambda$ . Ее находят экспериментально, основываясь на законе теплопроводности Фурье:

$$Q = \lambda \frac{F\tau\Delta t}{\delta}, \quad (3.38)$$

где  $Q$  – количество теплоты, Дж;  $F$  – площадь сечения, перпендикулярная направлению теплового потока,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta t$  – разность температур,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\delta$  – толщина материала, м;  $\tau$  – время, с.

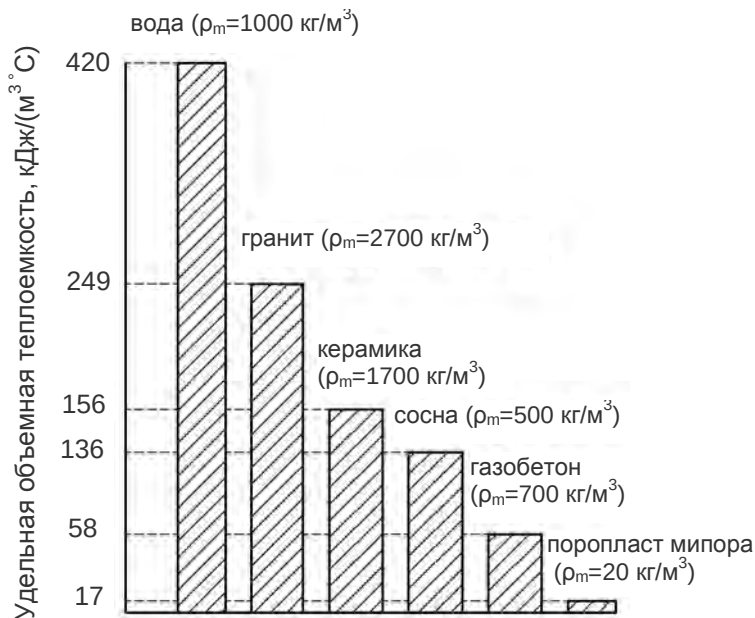


**Рис. 3.17.** Удельная теплоемкость различных материалов

В наибольшей степени на теплопроводность влияет пористость материалов (рис. 3.18). По мере увеличения объема пор в материалах они в большей мере могут заполняться воздухом, имеющим наименьшую теплопроводность из известных веществ. Ниже для сравнения приведена теплопроводность некоторых материалов  $\lambda$ , с различной средней плотностью и, соответственно, пористостью:

|                  | $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup> | $\lambda$ , Вт/(м·°C) |
|------------------|------------------------------|-----------------------|
| Гранит           | 2600...2800                  | 2,8...3,4             |
| Сосна            | 530                          | 0,17                  |
| Сталь            | 7860                         | 58,00                 |
| Минеральная вата | 200...400                    | 0,06                  |
| Кирпич           | 1200                         | 0,44                  |
|                  | 1900                         | 0,8                   |

Для снижения теплопроводности материалов желательно создание мелкопористого строения, при котором незначителен перенос

$\lambda$ , Вт/(м·°C

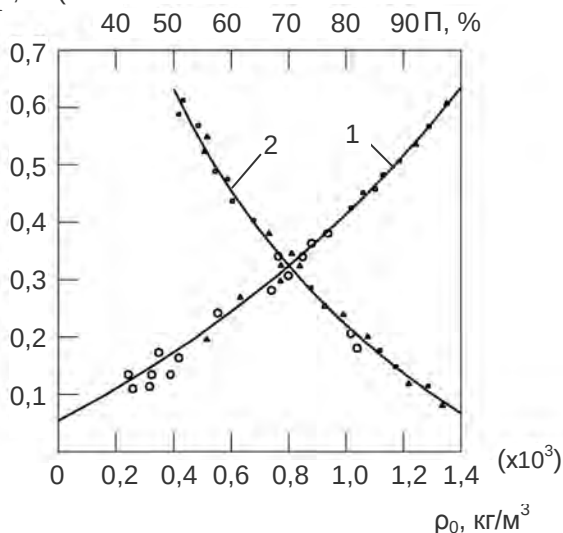


**Рис. 3.18.** Зависимость теплопроводности керамических огнеупоров от: 1 — средней плотности ( $\rho_0$ ); 2 — пористости (П)

теплоты за счет конвекции, т.е. перемещения нагретого воздуха в порах. Теплопроводность уменьшается также по мере усложнения химического состава материалов, перехода от кристаллической структуры к аморфной.

Предложен ряд формул для расчета теплопроводности в зависимости от пористости. Наиболее простые из них, рекомендованные к использованию до температуры 500°C,

имеют вид:

$$\lambda = \lambda_0(1 - КП), \quad (3.39)$$

где  $\lambda$  — теплопроводность пористого материала;  $\lambda_0$  — теплопроводность материала при отсутствии пор; П — общая пористость (в частях единицы); К — коэффициент, учитывающий особенности состава и структуры материала.

### 3. Общие свойства строительных материалов

Для расчета ориентировочного значения теплопроводности воздушносухих (влажностью 1-7%) минеральных материалов в зависимости от плотности В.П.Некрасов предложил формулу:

$$\lambda = 1,16\sqrt{0,0196 + 0,22d^2} - 0,16, \quad (3.40)$$

где  $d$  – относительная плотность.

Теплопроводность металлов с повышением температуры уменьшается, для большинства других материалов возрастает. Это особенно необходимо учитывать при выборе материалов для тепловой изоляции паропроводов, котельных установок и др.

Расчетные значения теплопроводности материалов линейно изменяются с изменением влажности  $W$ :

$$\lambda_w = \lambda_c + \Delta\lambda W, \quad (3.41)$$

где  $\Delta\lambda$  – прирост теплопроводности, % на каждый процент изменения влажности материала (для минеральных материалов  $\Delta\lambda=0,0023$  при положительных температурах и  $0,047$  – при отрицательных);  $\lambda_c$  – теплопроводность сухого материала.

В порах материалов диаметром  $0,027-0,1$  мм теплопроводность воздуха при  $0^\circ\text{C}$  составляет  $0,024-0,031\text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C})$ , воды –  $0,58$ , льда –  $2,326\text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C})$ .

Теплопроводность – один из определяющих показателей качества теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов. С теплопроводностью однозначно связано *термическое сопротивление*  $R_t$ , характеризующее сопротивление материалов теплопередаче:

$$R_t = \delta / \lambda, \quad (3.42)$$

где  $\delta$  – толщина материала.

Величина термического сопротивления – один из важнейших нормируемых показателей для ограждающих конструкций, устанавливаемый в зависимости от температурной зоны их эксплуатации. Например, для наружных стен из кирпича, камней и мелких блоков при использовании утеплителей термическое сопротивление принимается равным  $1,7-2,2$ , покрытий и перекрытий –  $2-2,7$ , окон и балконных дверей –  $0,39-0,5$  ( $\text{м}^2\text{ }^\circ\text{C})/\text{Вт}$ . Для многослойных ограждающих конструкций величина термического сопротивления вычисляется по формуле:



$$R_{\tau} = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (3.43)$$

где  $\delta_i$ ,  $\lambda_i$  – толщина и коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя конструкции.

Увеличение амплитуды колебаний атомов и молекул при нагревании приводит к изменению межатомного расстояния и тепловому расширению твердых тел. Для характеристики теплового расширения используется обычно *температурный коэффициент линейного расширения*  $\alpha_p$  (коэффициент термического расширения – к.т.р.), учитываемый при устройстве температурных швов, нанесении защитных покрытий, подборе составов композиционных материалов. Он характеризуется относительным удлинением образца при нагревании его на  $1^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_p = \Delta l / l \Delta t, \quad (3.44)$$

где  $\Delta l$  – изменение размера образца после нагревания;  $l$  – начальный размер образца;  $\Delta t$  – изменение температуры при нагревании образца.

Температурный коэффициент линейного расширения органических материалов значительно больше, чем неорганических. Так, если для кварцевого стекла он равен  $0,5 \cdot 10^{-6}$ , дюралюминиевого сплава –  $2,2 \cdot 10^{-6}$ , стали –  $12 \cdot 10^{-6}$ , то для поливинилхлорида  $\alpha_p = (80 \dots 90) \cdot 10^{-6}$ ; полиэтилена –  $(160 \dots 230) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ .

С уменьшением температурного коэффициента линейного расширения возрастает *термостойкость* – способность материалов сохранять механические характеристики при одно- и многократных термических воздействиях.

К материалам высокой термостойкости относятся материалы с температурным коэффициентом линейного расширения меньшим  $45 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$ . Например, изделия из плавленого кремнезема ( $\alpha_p < 7 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$ ) не разрушаются при термическом ударе практически любой интенсивности.

Термостойкость материалов определяют температурой, нагревание до которой с последующим быстрым охлаждением резко уменьшает прочность материалов. Возможна характеристика термостойкости числом теплосмен, выдерживаемым материалом при определенной температуре. Термостойкость характеризуют также в форме критериальной зависимости, например, в виде отношения

### 3. Общие свойства строительных материалов

---

прочности к величине термических напряжений. Последние могут быть вызваны градиентами температур, анизотропией температурного коэффициента линейного расширения, локальными химическими реакциями и полиморфизмом. Термостойкость материалов увеличивается с повышением их теплопроводности и прочности, уменьшением модуля упругости, увеличением их однородности.

Способность материала противостоять действию высоких температур, не расплавляясь, называют *огнеупорностью*. Ее характеризуют обычно температурой, при которой образец пирамидальной формы при деформации касается вершиной основания. Высокая огнеупорность и температура плавления характерны для однокомпонентных систем (например, чистых оксидов). Для многокомпонентных материалов появление расплава и соответственно размягчение при нагревании наблюдается при более низких температурах.

К огнеупорным относятся материалы с огнеупорностью 1580-1770 (динасовые, кварцевые, шамотные и др.), высокоогнеупорными – выше 1770°C (высокоглиноземистые, хромитовые, карборундовые и др.).

Для материалов, работающих при высоких температурах, решающее значение могут иметь свойства сопротивляться деформированию и противостоять химическому разрушению – *жаропрочность* и *жаростойкость*. Примерами жаропрочных материалов являются сплавы на основе железа, никеля и кобальта, сложные металлооксидные, металлокарбидные и другие композиционные материалы.

Различают металлические, керамические, керамико-металлические, углеграфитовые, стеклокристаллические жаростойкие материалы. Жаростойкость можно улучшить армированием с помощью нитеобразных кристаллов и поликристаллических волокон или нанесением жаростойких покрытий.

Способность материалов не ухудшать физико-механические свойства под действием открытого пламени характеризует их *огнестойкость*. Предел огнестойкости строительной конструкции измеряется продолжительностью действия открытого пламени до появления сквозных трещин или отверстий, через которые свободно проникают огонь и продукты горения. Предел огнестойкости достигается также тогда, когда повышение температуры на необогреваемой поверхности составляет более 220°C и конструкция теряет не-

сущую способность. Для незащищенных металлических конструкций предел огнестойкости составляет 0,5 ч, железобетона – 1-2, бетона – 2-5 ч.

Главным показателем пожарной безопасности материалов является их *сгораемость*. По сгораемости строительные материалы разделяют на три группы:

- несгораемые, не способные гореть на воздухе;
- трудносгораемые – способные воспламеняться под воздействием источника горения, затухающие после его удаления;
- сгораемые – способные самостоятельно гореть в воздушной среде.

К несгораемым относятся природные и искусственные неорганические материалы, трудносгораемым – материалы, состоящие из несгораемых и сгораемых компонентов (асфальтобетон, бетонные изделия на органических заполнителях и др.), сгораемым – многие органические материалы без добавок антипиренов (аммонийных, борно- и фосфорнокислых солей, и др.).

**Оптические свойства.** Для многих, особенно отделочных строительных материалов, важное значение имеют такие оптические свойства, как цвет, блеск, прозрачность.

*Цвет* материалов физически можно объяснить избирательным поглощением видимой области спектра. Различают две группы цветовой окраски: ахроматическую (черно-белую), имеющую переходные оттенки, и хроматическую с определенной насыщенностью цвета, т.е. степенью приближения к чистой спектральной окраске. К основным спектрально чистым цветам, получаемым при разложении белого луча, проходящего через прозрачную призму, относят красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Учитывая ассоциативное восприятие цвета, различают оттенки льда и огня или холодные (коротковолновые – голубые, синие, фиолетовые) и теплые (длинноволновые – красные, оранжевые, желтые).

Цвет природных минеральных материалов обусловлен характером электронного взаимодействия слагающих их элементов, а также структурными дефектами, видом и концентрацией примесей.

Хромофорные свойства, т.е. способность придавать материалам определенный цвет имеют ионы переходных металлов – титана, ванадия, хрома, железа, марганца, кобальта, никеля и меди. Особое

### 3. Общие свойства строительных материалов

место среди хромофоров принадлежит железу. Наиболее интенсивную окраску дает  $\text{Fe}^{3+}$  (красную, бурую, желтую, зеленую). Ион  $\text{Fe}^{2+}$  вызывает более бледную, чем  $\text{Fe}^{3+}$  зеленоватую и голубоватую окраску. Сочетание ионов  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  придает сине-черную окраску минералам.

На цвет минералов существенно влияют также условия их образования, главным образом, температура и характер окружающей среды.

Примеси, вызывающие окраску минералов, могут быть неорганическими и органическими, твердыми, жидкими и газообразными. Наиболее интенсивное окрашивание минералам придают тонкодисперсные примеси.

Для получения разнообразных цветных смесей в строительстве применяют преимущественно минеральные краски (*пигменты*), представленные, в основном, оксидами и солями как природного, так и искусственного происхождения.

*Блеск* – свойство материалов отражать падающий на них свет. Количественно он выражается коэффициентом отражения  $K_{\text{отр}}$ , функционально связанным с показателем преломления  $n$ , а для непрозрачных материалов и коэффициентом поглощения  $K_{\text{погл}}$ :

$$K_{\text{отр}} = \frac{(n - 1^2) + n^2 K_{\text{погл}}}{(n + 1^2) + n^2 K_{\text{погл}}} \quad (3.45)$$

Для минералов, слагающих природные каменные материалы, часто (до 70%) встречается стеклянный блеск ( $n=1,5-1,8$ ), реже (до 1-2%) – алмазный и металлический блеск ( $n=2,7-3,4$ ). Блеск зависит от гладкости поверхности материалов. Высокого блеска поверхности достигают, полируя ее или используя глазури и эмали.

*Прозрачность* – свойство материалов пропускать свет без рассеивания. Мерой прозрачности является коэффициент прозрачности:

$$K_{\text{пр}} = I' / I_0, \quad (3.46)$$

где  $I'$  и  $I_0$  – соответственно, интенсивность света, прошедшего через поверхность и падающего на поверхность материала.

Светопропускание любого материала экспоненциально связано с коэффициентом поглощения  $K_{\text{погл}}$  и толщиной поглощающего слоя  $\delta$  (закон Ламберта-Байера):

$$K_{\text{пр}} = e^{-K_{\text{погл}} \delta}. \quad (3.47)$$

При  $K_{\text{пр}}=0$  материал непрозрачен. Коэффициент прозрачности приближается к единице для оптического стекла, из которого изготавливают линзы и световоды. Наряду с коэффициентом прозрачности используют показатель оптической плотности:

$$\rho_{\text{опт}} = -\lg K_{\text{пр}}. \quad (3.48)$$

Уменьшить прозрачность материала можно введением различных примесей, образованием микротрещин и относительно крупных дислокаций.

Потеря прозрачности стеклом – *глушение* обеспечивается образованием мельчайших кристалликов, например, оксидов олова, титана, циркония. Показатели преломления стекла как дисперсионной среды, и кристаллов как дисперсной фазы, должны в глушеном стекле существенно различаться. Этот принцип используют также для глушения лакокрасочных покрытий, содержащих пленкообразующие вещества и пигменты.

**Акустические свойства.** Для строительных материалов, используемых в ограждающих конструкциях, учитывают при необходимости акустическое сопротивление и звукопоглощение материалов.

*Акустическое сопротивление* характеризует отношение амплитуды акустического давления и скорости колебаний частиц материала под влиянием этого давления. Удельное акустическое давление находят по формуле:

$$Z = A_{\text{а.д}} / A_{\text{с}}, \quad (3.49)$$

где  $A_{\text{а.д}}$  и  $A_{\text{с}}$  – соответственно комплексная амплитуда акустического давления и линейная скорость колебаний частиц среды.

Если не учитывать потери при распространении звуковых волн, то удельное акустическое давление можно найти как произведение скорости распространения звука в данной среде на ее плотность. На значение удельного акустического сопротивления существенно влияет частота колебаний среды. Для определения акустического сопротивления материалов измеряют акустическое давление в трубе, закрытой с одной стороны образцом.

*Звукопоглощение* материалов характеризуется степенью или коэффициентом поглощения звука. Способность материалов поглощать звук обусловлена их пористостью, она растет с повышением количества открытых пор, максимальный диаметр которых не пре-

### 3. Общие свойства строительных материалов

---

вышает 2 мм. На средних частотах материалы способны поглощать до 40% звуковой энергии волн. Звукопоглощающие материалы обеспечивают также необходимую *длительность реверберации* – постепенного затухания звука в помещениях. Длительность реверберации в зависимости от интерьера помещения и частоты колебаний составляет 0,2-2,0 с.

К распространенным звукопоглощающим материалам относятся минераловатные и стекловолоконистые плиты, имеющие открытую пористость не менее чем 75%.

Для повышения звукопоглощения конструкций в области низких частот увеличивают толщину материалов и обеспечивают наличие воздушных прослоек. Высокое звукопоглощение в широком диапазоне частот обеспечивается комбинацией перфорированного покрытия с пористым материалом.

**Электрофизические свойства.** Одним из основных электрофизических свойств материалов является *электропроводность* – способность проводить электрический ток. Ее измеряют отношением плотности тока к напряженности электрического поля (удельная электрическая проводимость). Этот показатель для электропроводных материалов равен  $10^4$ - $10^6$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup> полупроводников  $10^{-10}$ - $10^4$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>, электроизоляционных – менее  $10^{-10}$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>. Для проводников и полупроводников характерна электронная проводимость, для различных видов электроизоляторов (диэлектриков) – преимущественно ионная. Ионная электропроводность растет с повышением температуры (рис. 3.19). Примеси, повышая коэффициент диффузии, также способствуют увеличению ионной электропроводности. Влияние пористости на электропроводность близко к ее влиянию на теплопроводность. При наличии сравнительно небольшого количества изолированных равномерно-распределенных пор электропроводность уменьшается почти пропорционально увеличению пористости. При повышенной пористости влияние ее на электропроводность возрастает.

Характерными твердыми электропроводными материалами являются металлы и их сплавы, электроизоляционными – керамика, стекло, слюда, асбест.

Свойством обратным электропроводности является *электрическое сопротивление*. Оно зависит от минерального и химического состава, структуры и влажности материала, давления и температуры

(рис. 3.20). Например, оксиды  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  повышают электрическое сопротивление, а  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$  – уменьшают.

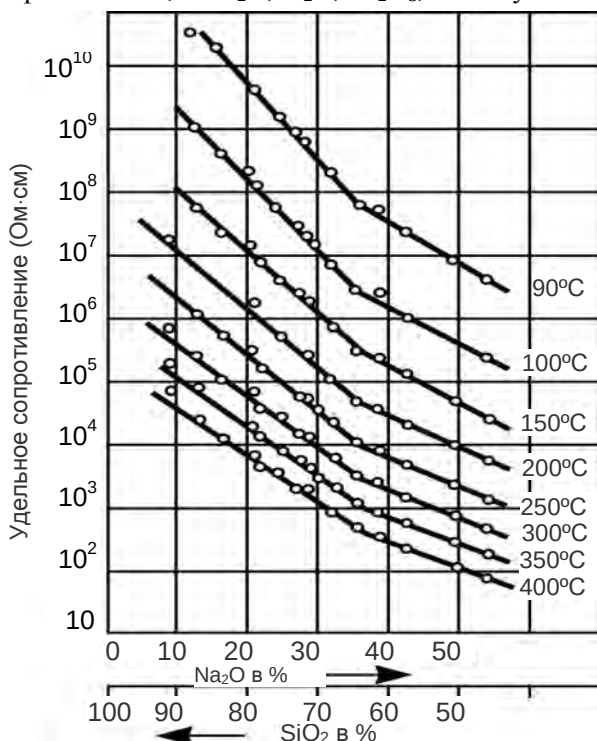


**Рис. 3.19.** Электропроводность стекла в системе  $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$

Характерным процессом для материалов, входящих в группу диэлектриков, является *поляризация* – ограниченное смещение зарядов или ориентация дипольных молекул. Поляризация диэлектриков сопровождается рассеиванием энергии, что вызывает их разогрев. Об эффекте поляризации судят по значениям диэлектрической проницаемости и величине угла диэлектрических потерь. Любой диэлектрик может быть использован при напряжениях, не превышающих предельных значений, характерных для него в определенных условиях эксплуатации. При более высоких напряжениях наступает явление пробоя диэлектриков и полная потеря им изоляци-

### 3. Общие свойства строительных материалов

онных свойств. Способность материалов выдерживать напряжение (*электрическая прочность*) характеризуется величиной пробивной напряженности электрического поля.

**Радиационно-физические свойства.** Основными характеристиками радиационно-физических свойств материалов являются способность материалов поглощать ионизационные излучения, прежде

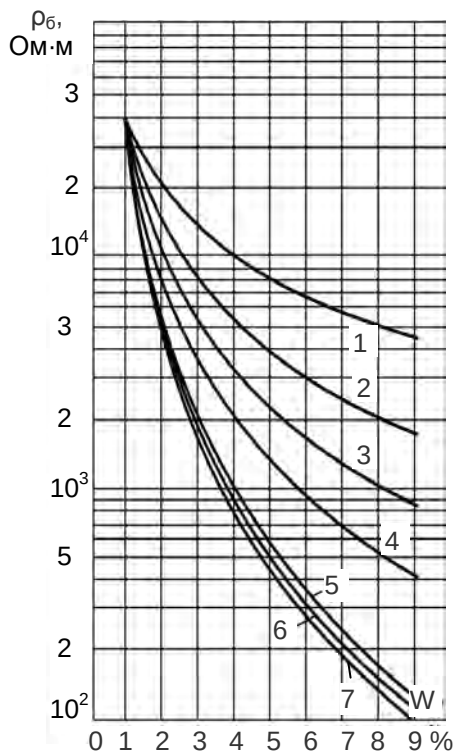


**Рис. 3.20.** Зависимость удельного сопротивления бетона класса В15 от температуры и влажности (W): 1 — при  $-10^{\circ}\text{C}$ ; 2 — при  $-7^{\circ}\text{C}$ ; 3 — при  $-5^{\circ}\text{C}$ ; 4 — при  $-3^{\circ}\text{C}$ ; 5 — при  $0^{\circ}\text{C}$ ; 6 — при  $+5^{\circ}\text{C}$ ; 7 — при  $+10^{\circ}\text{C}$

всего, нейтроны и  $\gamma$ -лучи и стойкость к ним (*радиационная стойкость*). Эти свойства учитываются при возведении конструкций атомных электростанций, предприятий по производству изотопов и др. Из всех известных эксплуатационных факторов, воздействующих на материалы, облучение относится к числу сильнейших. Основными параметрами ионизирующего излучения являются плотность потока частиц или квантов и их энергия.

Тепловые нейтроны эффективно поглощаются материалами, содержащими атомы бора, кадмия, гафния и др. Для ослабления потока быстрых нейтронов, кроме того, используют материалы, содержащие такие легкие элементы как водород, литий, бериллий, углерод. Для материалов, поглощающих нейтронное

излучение, часто используют элементарный бор, нитрид или карбид бора. С этой целью используют боросодержащую сталь.



Поглощение  $\gamma$ -излучения усиливается с повышением плотности материалов. Для поглощения излучения этого вида наряду с металлами используют особо тяжелый бетон, плотность которого достигает  $6000 \text{ кг/м}^3$  и более. Повышение содержания в бетоне легких элементов (водорода, бора и др.) дает возможность использовать бетон для поглощения как  $\gamma$ -, так и нейтронного излучения.

При воздействии ионизирующих излучений на материалы происходит разрыв химических связей, образование свободных радикалов, смещение атомов из равновесного положения в кристаллической решетке и ее деформация. Передача энергии излучения материалу может приводить к нагреву его до высоких температур и оплавлению, переходу из кристаллического состояния в аморфное. Степень и глубина качественных изменений материалов зависит от дозы облучения.

Возникающие радиационные дефекты структуры материалов при их облучении приводят к развитию в материалах внутренних напряжений и деформаций, образованию трещин. Изменяются также упругие характеристики, температурная деформативность, теплопроводность, плотность и другие свойства.

Радиационная стойкость материалов зависит от их состава и структуры. Высокую радиационную стойкость имеют нержавеющие стали, сплавы хрома, циркония, ванадия и др. Радиационная стойкость горных пород и искусственных каменных материалов растет, если увеличивается, в их составе содержание аморфной фазы и уменьшаются размеры кристаллов. Для бетонов и растворов позитивное значение имеют увеличение содержания цементного камня, уменьшение крупности заполнителя. Установлено, что при значительных дозах облучения прочность бетона на сжатие снижается в 4 раза, а на растяжение более чем в 2 раза.

Допускаемая интенсивность облучения на бетоны зависит от вида крупного заполнителя,  $10^{19}$  нейтр-см<sup>-2</sup>:

|                                             |         |
|---------------------------------------------|---------|
| Гранит, диорит, сиенит, габбро, лабрадориты | 2...5   |
| Дуниты, базальт, диабаз, андезит, оливиниты | 5...15  |
| Серпентинит                                 | 10...50 |

|                   |          |
|-------------------|----------|
| Известняк         | 10       |
| Магнетит, гематит | 10...100 |
| Хромит            | 200      |

*Радиоактивность* строительных материалов характеризуется содержанием в них атомов химических элементов, способных к радиоактивному распаду (радионуклидов ( $A_{эф}$ ), Бк/кг).

Для исходного сырья и готовых строительных материалов и изделий характерна естественная радиоактивность. Она обусловлена содержанием в материалах природных радионуклидов: радия-226, тория-232, калия-40. Основной характеристикой радиоактивности строительных материалов является суммарная удельная активность естественных радионуклидов ( $A_{эф}$ ) (отношение активности радионуклидов в образце к массе образца, Бк/кг). Ее величину определяют по формуле:

$$A_{эф} = A_{Ra} + 1.31A_{Th} + 0,085A_{K}, \quad (3.50)$$

где  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$ ,  $A_{K}$  – удельные активности соответственно радия-226, тория-232 и калия-40.

Таблица 3.5

Классы материалов по  $A_{эф}$ 

| Удельная эффективная активность ( $A_{эф}$ ), Бк/кг | Класс материала | Область применения                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| До 370                                              | I               | Все виды строительства                                                                                                        |
| От 370 до 740                                       | II              | Дорожное строительство в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки, строительство производственных сооружений |
| От 740 до 1500                                      | III             | Дорожное строительство вне населенных пунктов                                                                                 |
| От 1500 до 4000                                     | IV              | Вопрос о строительстве решается по согласованию с Госкомсанэпиднадзором                                                       |

По величине суммарной удельной эффективной активности радионуклидов строительные материалы разделяют на классы, для которых установлены возможные области использования (табл. 3.5).

### 3.3. Химические свойства

В группу химических входят свойства материалов, характеризующие их способность к химическим превращениям под влиянием веществ, находящихся с ними в непосредственном контакте.

Способность материалов не разрушаться в химически агрессивных средах характеризует их химическую стойкость. *Коррозия* (от лат. “corrosio” – разъедание) – разрушение материалов под влиянием агрессивной среды. По степени влияния на строительные конструкции среды разделяют на неагрессивные (Н), слабоагрессивные (Сл), среднеагрессивные (Ср) и сильноагрессивные (Си). Критериями агрессивности среды к тем или иным материалам являются снижение их прочности и внешние проявления признаков коррозии при эксплуатации конструкций на протяжении одного года.

Различают газообразные, жидкие и твердые агрессивные среды. В зависимости от вида и концентрации газовой среды условно подразделяют на четыре группы: А, В, С и D. По мере увеличения растворимости газов в воде, повышения температуры и влажности агрессивность газовой среды возрастает. Например, если при относительной влажности  $W < 60\%$  среда группы С относительно бетона и асбестоцемента является слабоагрессивной, то при  $W = 61-75$  она становится средне-, а при  $W > 75$  – сильноагрессивной.

Под влиянием кислорода или озона развивается окислительная деструкция полимеров. Этому способствует также свет, влажность, теплота. Изменения, которые при этом происходят, называют *старением полимеров*.

Степень агрессивного влияния жидких сред определяется концентрацией агрессивных веществ, температурой, напором или скоростью движения жидкости вблизи поверхности материала. К агрессивным веществам, растворенным в воде, относятся кислоты, едкие щелочи, некоторые соли. В частности, применительно к цементным бетонам агрессивное влияние воды зависит в основном от концентрации ионов водорода (рН), содержания свободной углекислоты, магниевых солей и сульфатов.

Общее содержание солей в речных водах не превышает 0,3-0,5 г/л. Грунтовые и подземные природные воды содержат повышенное количество минеральных солей и других примесей. Морская (оке-

### 3. Общие свойства строительных материалов

---

анская) вода может содержать до 35 мг/л солей, из них до 70% хлорида натрия, около 11% сульфатов магния, кальция, калия.

Стойкость материалов к щелочным и кислотным растворам зависит от их состава и структуры. Неметаллические кислотостойкие материалы по химическому составу представлены преимущественно кислотными, щелочестойкие – основными оксидами. Например, силикатные материалы (стекло, кварцит, асбест и др.), содержащие, в основном, оксид кремния, стойки к действию кислот, но способны взаимодействовать со щелочами, а магнезит, известняк, мрамор, в состав которых входит преимущественно оксид кальция или магния, щелочестойки, но разрушаются под действием кислот.

К наиболее химически стойким относятся полимерные материалы. Вместе с тем ряд из них при определенных условиях также подвергаются химической деструкции. Сравнительно легко разлагаются в горячей воде, кислотах и щелочах гетероцепные полимеры, содержащие в главной цепи атомы кислорода, азота, серы (полиамиды, тиоколы, силоксаны, полиэферы и др.). Легко реагируют с кислотами полимеры, структура которых характеризуется двойными связями, например, некоторые виды синтетических каучуков и поливинилацетат.

Для металлических сплавов при одновременном воздействии циклически изменяющихся нагрузок и внешней коррозионной среды характерна *коррозионная усталость*. Критерием коррозионной усталости является максимальное механическое напряжение, при котором после установленного числа циклов переменной нагрузки в заданных условиях материал еще не разрушается полностью (*условный предел коррозионной усталости*). Сопротивление коррозионной усталости повышают нанесением на металлы гальванических, полимерных и др. защитных покрытий, обработкой наклепом и закалкой, легированием.

Серьезные повреждения для различных материалов возможны при воздействии биологических факторов (*биокоррозия*). Например, интенсивную биокоррозию бетона вызывают динитрофицирующие, уролитические и другие бактерии. Динитрофицирующие бактерии окисляют сернистые соединения, имеющиеся в сточных водах сначала до сероводорода, а затем до серной кислоты. Уролитические бактерии действуют, главным образом, на мочевины, гидролизую ее. При этом выделяются аммиак и углекислота.

Бактерии, образующие кислоты, вызывают активную коррозию также ряда металлов и сплавов.

Основные биологические факторы, воздействующие на древесину – грибы. Грибы выделяют особый фермент – цитазу, превращающий нерастворимую в воде целлюлозу  $(C_6H_{10}O_5)_n$  в растворимую глюкозу  $(C_6H_{12}O_6)_n$ .

К твердым агрессивным средам, воздействующим на материалы, относятся соли, аэрозоли, пыль. Степень их агрессивного влияния определяется дисперсностью, растворимостью в воде, гигроскопичностью.

Стойкость материалов к химической коррозии повышают, увеличивая их плотность, подбирая химико-минералогический состав и регулируя структуру, вводя специальные вещества, замедляющие коррозионные процессы (ингибиторы), применяя различные защитные покрытия.

К химическим свойствам материалов относится их *токсичность* (от греч. *toxicon* – яд) – способность оказывать вредное воздействие на живой организм обусловленное наличием ядовитых веществ – токсикантов. Токсичность строительных материалов оценивают путем сравнения их состава с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) содержащимися в них и выделяющимися в окружающую среду токсических веществ.

Основным возможным источником токсических веществ в жилых зданиях являются некоторые полимерные материалы, например, в случае незавершенности процессов полимеризации или старения и деструкции под воздействием эксплуатационных факторов. Применяемые в строительстве материалы должны соответствовать требованиям экологической безопасности, обладать удовлетворительными санитарно-гигиеническими показателями, установленными в нормативных документах.

## 4. ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Выбор оптимальных составов материалов и технологических параметров их получения является результатом необходимых теоретических и экспериментальных и технико-экономических обоснований.

### 4.1. Термодинамический метод и диаграммы состояния

Получение искусственных строительных материалов основано на комплексе процессов, сопровождаемых, как правило, химическими взаимодействиями и полиморфными преобразованиями веществ и соединений. Вероятность химических взаимодействий, выход продуктов реакций, тепловые эффекты, которые их сопровождают, можно предварительно оценить с помощью *термодинамического метода*. Этот метод основан на использовании первого и второго законов термодинамики. Первый закон выражает идею сохранения энергии, а второй указывает на направление самопроизвольного протекания процесса.

Возможность самопроизвольного протекания химической реакции или фазового преобразования можно прогнозировать с помощью уравнения Гиббса-Гельмгольца:

$$\Delta Z = \Delta H - T\Delta S, \quad (4.1)$$

где  $\Delta Z$  – изменение изобарно-изотермического потенциала (энергия Гиббса);  $\Delta H$ ,  $\Delta S$  – изменения соответственно энтальпии и энтропии процесса;  $T$  – температура.

Принципиальная возможность или невозможность любого взаимодействия определяется знаком  $\Delta Z$ . Реакция:



где  $A$  и  $B$  – реагирующие компоненты;  $v_1$  и  $v_2$  – стехиометрические коэффициенты), возможна, если  $\Delta Z < 0$ .

Если  $\Delta Z > 0$ , то может происходить лишь обратный процесс.

Между любым и стандартным (рассчитанным для базовой температуры 298° К) значениями изобарно-изотермического потенциала  $Z_0$  существует зависимость:

$$\Delta Z = \Delta Z_0 + RT \ln \alpha, \quad (4.3)$$

где  $R$  – газовая постоянная;  $\alpha$  – активность веществ (для чистых жидкостей и твердых тел  $\alpha=1$ ).

Определим термодинамическим методом в качестве примера возможность протекания реакции:



Для  $\text{CaO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CaCO}_3$  справочные значения  $\Delta H^\circ_{298}$  соответственно равны, кДж/моль: -636,46; -394,07; -1208,61, а значения  $\Delta S^\circ_{298}$  кДж/моль·К: 0,0398; 0,2139 и 0,0930.

Значения  $\Delta H$  и  $\Delta S$  для любой реакции равны разности соответственно между суммой энтальпий продуктов реакций ( $\text{CaCO}_3$ ) и исходных продуктов ( $\text{CaO}$  и  $\text{CO}_2$ ):

$$\Delta Z = -1208,61 - (-636,46 - 394,07) - 298 (0,0930 - 0,0398 - 0,2139) = -130,2 \text{ кДж/моль}.$$

Итак, реакция протекает с уменьшением свободной энергии, то есть самопроизвольно.

Условию равновесия отвечает минимум изменения свободной энергии, то есть  $\Delta Z=0$ . Найдем необходимую температуру  $T$  для приведенной выше реакции, т.е. условие, при котором  $\Delta Z=0$ .

$$T = \Delta H / \Delta S = (-1208,61 - (-636,46 - 394,07)) / (0,0930 - 0,0398 - 0,2139) = (-178,08) : (-0,1607) = 1108^\circ\text{K}$$

Для практических целей важно знать не только возможность химического взаимодействия, а и скорость реакции, а также и факторы, от которых она зависит. Количественные закономерности развития реакций во времени изучает *химическая кинетика*.

Для *гомогенных* химических реакций, (протекающих в объеме одной фазы), скорость реакции  $\vartheta$  прямо пропорциональна произведениям концентраций реагирующих веществ  $C$ , взятых в степени их стехиометрических коэффициентов. В этом состоит основной закон химической кинетики. Для реакции (4.2):

$$\vartheta = K C_A^{v_1} C_B^{v_2}, \quad (4.5)$$

где  $K$  – константа скорости реакции.

Константа скорости зависит от температуры. В соответствии с уравнением Аррениуса:

$$K = K_0 e^{-E/RT}, \quad (4.6)$$

где  $K_0$  – константа, определяющая условия протекания реакции.

В уравнении (4.6)  $E$  – эффективная энергия активации, под которой понимают избыточную энергию, необходимую для осуществления реакции. Значение  $E$  вычисляют по тангенсу угла наклона экспериментальной прямой в координатах  $\lg K - (1/T)$  (рис. 4.1).

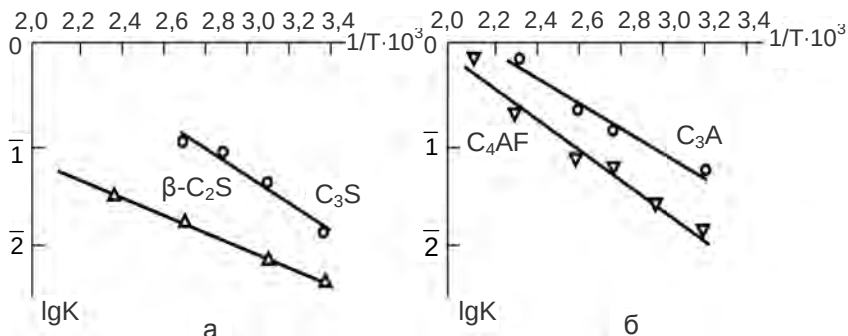


**Рис. 4.1.** Влияние температуры на константу скорости гидратации мономинеральных цементах (по Т.М.Берковичу): а –  $\text{C}_3\text{S}$  и  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ; б –  $\text{C}_3\text{A}$  и  $\text{C}_4\text{AF}$

Значения эффективной энергии активации большинства химических процессов составляют 40–400 кДж/моль; для процессов твердения строительных вяжущих они не превышают 40–50 кДж/моль. Показатель энергии активации уменьшают катализаторы – вещества, которые ускоряют химическую реакцию, но не входят в ее конечные продукты. Катализаторами, например, реакций полимеризации и поликонденсации служат добавки – отвердители.

При изготовлении и эксплуатации строительных материалов характерны *гетерогенные* химические процессы, которые происходят на поверхности раздела нескольких фаз (твердение вяжущих, коррозия и т.п.). Скорость гетерогенных процессов зависит от площади реакционной поверхности, поэтому, чтобы ускорить твердение цемента, образование цементного клинкера, получение ряда керамических материалов и т.п., следует тонко измельчать исходные продукты. Поверхность раздела фаз увеличивают также другими методами, например, интенсивным перемешиванием, использованием теплообменных устройств и др.

В гетерогенных процессах самыми медленными стадиями являются диффузия исходных веществ в зону реакции и конечных продуктов из этой зоны. Если на поверхности раздела фаз с повышени-



ем температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  скорость реакции увеличивается приблизительно в 2-4 раза, то скорость диффузионных процессов на каждый градус повышения температуры возрастает на 1-3%.

*Равновесное состояние* отдельных веществ или их смесей зависит от внешних условий (температуры и давления) и характеризуется количеством и концентрацией образованных фаз. Соотношение между количеством компонентов, фаз и степеней свободы равновесной системы устанавливается правилом фаз Гиббса. Под количеством степеней свободы понимают наименьшее количество параметров, которые характеризуют состояние системы. Обычно для физико-химических систем параметрами состояния являются давление и температура. В соответствии с правилом фаз для физико-химических систем в состоянии равновесия сумма количества степеней свободы и количества фаз равняется количеству компонентов, увеличенному на два:

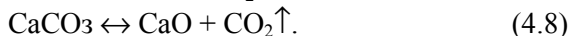
$$f + n = k + 2, \quad (4.7)$$

где  $f$  – количество степеней свободы;  $n$  – количество фаз;  $k$  – количество компонентов.

Рассмотрим примеры равновесных состояний физической и химической систем. Примером физической системы может быть вода.

Вода в состоянии равновесия состоит из одной, двух или трех фаз (рис. 4.2). Если вода состоит только из жидкой фазы, то температуру и давление можно изменять в определенных границах без образования новой фазы, то есть система двухвариантная ( $f=1+2-1=2$ ). Если имеются две фазы (предположим, жидкая вода и насыщенный пар), произвольно можно изменить лишь один из параметров системы – температуру или давление, и система является одновариантной ( $f=1+2-2=1$ ). Если давление больше равновесного, то вода превращается в пар и система становится однофазной. Равновесное существование трех фаз – льда, жидкой воды и пара, возможно только при определенных значениях температуры и давления ( $0,0076^{\circ}\text{C}$  и  $610,5 \text{ Па}$ ), такая система называется невариантной ( $f=1+2-3=0$ ).

Примером химической системы может быть карбонат кальция, распадаемый при нагревании на  $\text{CaO}$  и  $\text{CO}_2$ :



В отличие от предшествующей системы здесь два независимых компонента. Равновесие реакции возможно при изменении в опре-

деленных границах одного из параметров, например, температуры ( $f = 2 + 2 - 3 = 1$ ).

Для разработки технологических процессов получения материалов с заданными свойствами нужно знать условия существования отдельных фаз, поведение исследуемых систем при изменении температуры и давления. С этой целью применяют *диаграммы состояния* – графические изображения соотношения между параметрами состояния физико-химических систем. Наибольшее значение в строительном материаловедении имеют диаграммы типа состав – свойство и в особенности концентрационно-температурные диаграммы, их строят по экспериментальным данным, полученным с помощью разных физико-химических методов анализа. Каждой фазе на диаграмме состояния отвечает определенный геометрический образ – точка, линия или поверхность. Началу кристаллизации соответствует линия *ликвидуса*, выше которой размещена область существования жидкой фазы, а концу кристаллизации – линия *солидуса*, ниже которой лежит область существования твердой фазы.

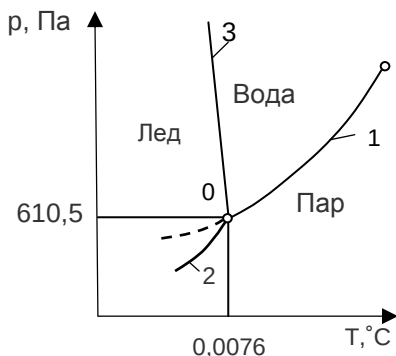


**Рис. 4.2.** Диаграмма  
Равновесного  
состояния воды:  
1 – вода-пар; 2 – лед-пар;  
3 – лед-вода

Рассмотрим простейшую диаграмму состояния двухкомпонентной системы А-В, которая характеризуется полной взаимной растворимостью в жидкой фазе и отсутствием растворимости в твердых фазах (рис. 4.3, а). Диаграмма делится линиями ликвидуса  $T_{\text{жЕ}}$  и  $T_{\text{вЕ}}$  и линией солидуса  $FG$  на четыре области. В границах области I, ограниченной снизу кривыми ликвидуса, существует только одна жидкая фаза, состав которой изменяется от А к В. Для нее возможны две степени свободы ( $f = 2 + 1 - 1 = 2$ ). Точки в областях II и III отвечают таким значениям температуры и концентрации системы, при которых могут существовать две фазы: твердая – кристаллы компонента А в области II, компонента В в об-

ластях II и III отвечают таким значениям температуры и концентрации системы, при которых могут существовать две фазы: твердая – кристаллы компонента А в области II, компонента В в об-

ласть III и жидкая – расплав. При этих условиях система имеет одну степень свободы ( $f=2+1-2=1$ ).

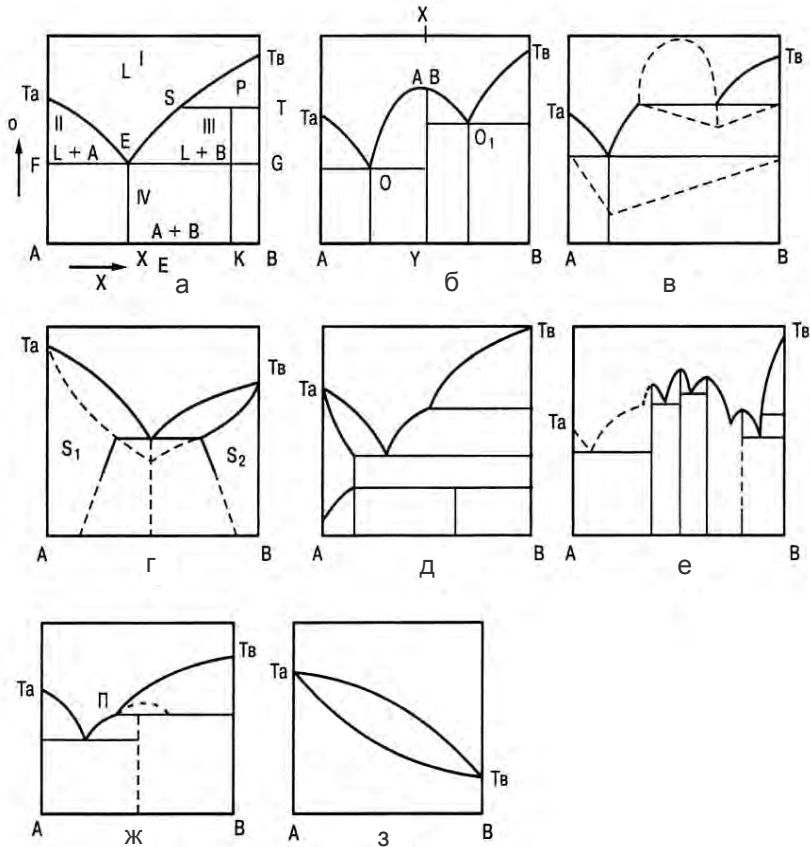


**Рис. 4.3.** Основные виды диаграмм состояния двухкомпонентных систем:

- а – простая эвтектика (полная растворимость в жидкой фазе и отсутствие растворимости в твердых фазах);
- б – химическое соединение;
- в – ограниченная растворимость в жидком виде;
- г – ограниченная растворимость в твердом виде;
- д – полиморфные превращения;
- е – несколько химических соединений;
- ж – химическое соединение, которое плавится с распадом;
- з – непрерывный ряд твердых растворов

В условиях, которые соответствуют точке Е, могут одновременно существовать три фазы, состоящие из двух компонентов, как в

#### 4. Основание составов и технологических параметров

твердом, так и в жидком состоянии, и система невариантна ( $f=2+1-3=0$ ). Содержание двух компонентов, соответствующее этой точке, называется эвтектическим составом, или *эвтектикой*. Эвтектическая температура – наиболее низкая из всех температур, при которых система может существовать в жидком состоянии.

В области IV, размещенной ниже линии солидуса, система находится лишь в твердом состоянии.

По диаграмме состояния с помощью графических и аналитических способов можно решать задачи определения составов смесей. Например, определим по диаграмме рис.4.3.а, состав расплава веществ А и В, взятых в определенном соотношении, при температуре Т. В соответствии с правилом рычага произведение массы кристаллов В на плечо TP равняется произведению массы расплава, который остался, т.е. L на плечо PS:

$$B \cdot TP = L \cdot PS. \quad (4.9)$$

Количество массовых частей  $B = L \cdot PS / TP$ , а расплава  $L = 100 - B$ . Подставив значения L в выражение (4.9), будем иметь:

$$B = (100 - B)PS / TP. \quad (4.10)$$

Замерив на диаграмме отрезки PS и TP, можно найти сначала количество кристаллов вещества В, выделяемого при температуре Т в точке Р, а потом расплава L (в мас. %).

Диаграммы систем, состоящих из двух компонентов, образующих между собой одно или несколько химических соединений, имеют некоторые особенности. Так, система на рис.4.3 б имеет две эвтектические точки О и О<sub>1</sub>; и один максимум АВ, означающий образование химического соединения. Первая эвтектическая точка О соответствует эвтектике веществ А и АВ. вторая О<sub>1</sub> - веществ АВ и В. Прямая XY разделяет диаграмму на две части, которые можно рассматривать как отдельные самостоятельные диаграммы двух-компонентных систем. Если на диаграмме есть два или более максимумов, то это значит, что данные компоненты образуют соответствующее количество химических соединений.

На диаграмме состояния системы с химическим соединением, которое плавится с разложением, ликвидус характеризуется «скрытым максимумом» (пунктирные линии на рис. 4.3), показывающим недостижимую для плавления этого соединения температуру. Точка П (рис. 4.3, ж), характеризующая состав расплава, возникающего

при разложении химического соединения, называется точкой *перитектики*.

При полиморфных превращениях, то есть преобразованиях, связанных с изменением кристаллической структуры веществ при изменении внешних условий, на диаграмме появляются дополнительные горизонтальные линии, которые определяют области устойчивости отдельных модификаций.

Диаграммы двухкомпонентных систем, которые образуют непрерывный ряд твердых растворов, не имеют минимумов на кривых плавления. Ниже линии солидуса и выше линии ликвидуса система однофазная и является твердым или жидким раствором.

На диаграмме (рис.4.3, г) представлены соответствующие области, которые возникают при образовании твердых растворов ограниченной растворимости (область  $S_1$  – твердые растворы компонента В в компоненте А,  $S_2$  – А в В).

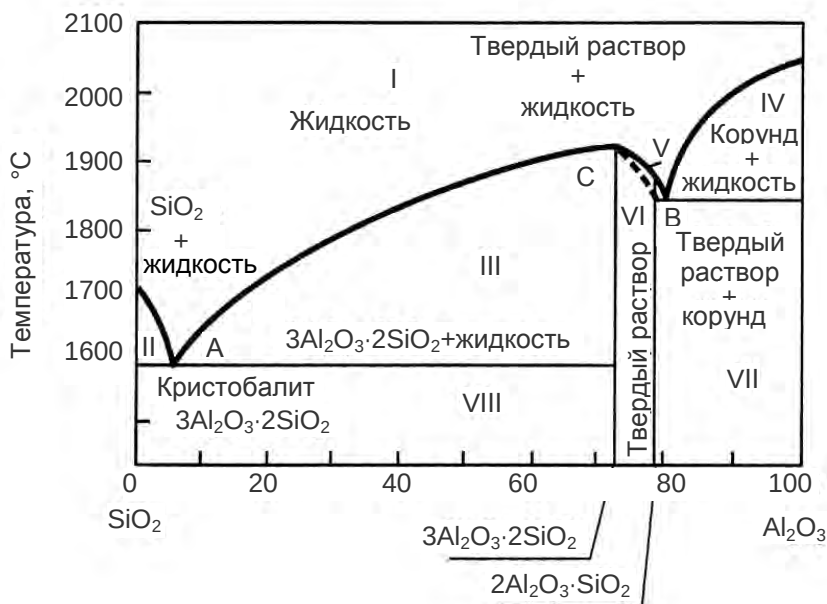


**Рис. 4.4.** Диаграмма состояния системы  $\text{SiO}_2$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$

На рис. 4.4 приведена диаграмма состояния двухкомпонентной системы  $\text{SiO}_2$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , используемой на практике при теоретических

#### 4. Основание составов и технологических параметров

обоснованиях технологических процессов керамических производств. Диаграмма состоит из восьми областей: I – расплав обоих компонентов; II – смесь расплава с кристаллами *кристобалита* – одной из полиморфных разновидностей кремнезема, находящейся в стабильном состоянии при температурах 1470°C...1728°C; III – расплав с изменяющимся содержанием кристаллов *муллита* (муллит – минерал  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ); IV – смесь расплава с кристаллами *корунда* ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ); V – смесь расплава и твердого раствора муллита; VI – твердый раствор муллита; VII – смесь твердого раствора муллита и кристаллов корунда; VIII – смесь кристаллов кристобалита и муллита.

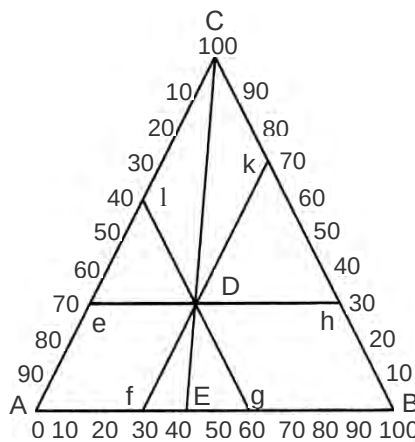


**Рис. 4.5.** Равносторонний треугольник концентраций

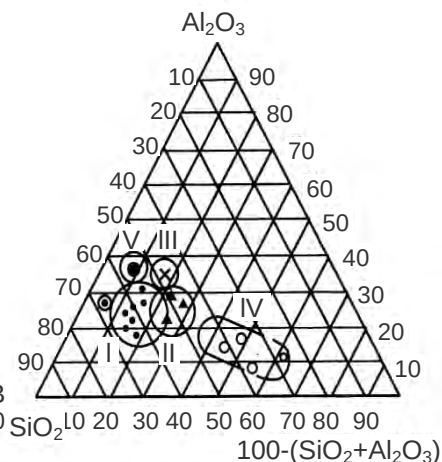


**Рис. 4.6.** Химический состав зол электростанций, которые работают на угле разных бассейнов: I-V –соответственно Кузнецкого, Донецкого, Подмосковного, Канско-Ачинского, Экибастузского

В системе  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  имеются две эвтектические точки – А при 1585°C и В при 1850°C и один максимум С, отвечающий составу муллита с температурой плавления 1910°C.

В трехкомпонентных системах составы показывают с помощью равностороннего треугольника концентраций. Вершины треугольника А В С означают 100% соответствующего компонента. Точки

внутри треугольника отражают определенные соотношения трех компонентов.

Так, на рис.4.5 состав, заданный точкой D, характеризуется таким содержанием компонентов: 40% А, 30% В, 30% С. На рис. 4.6 представлены примеры использования треугольника концентраций для изображения химического состава золы, полученной при сжигании каменного угля разных бассейнов.

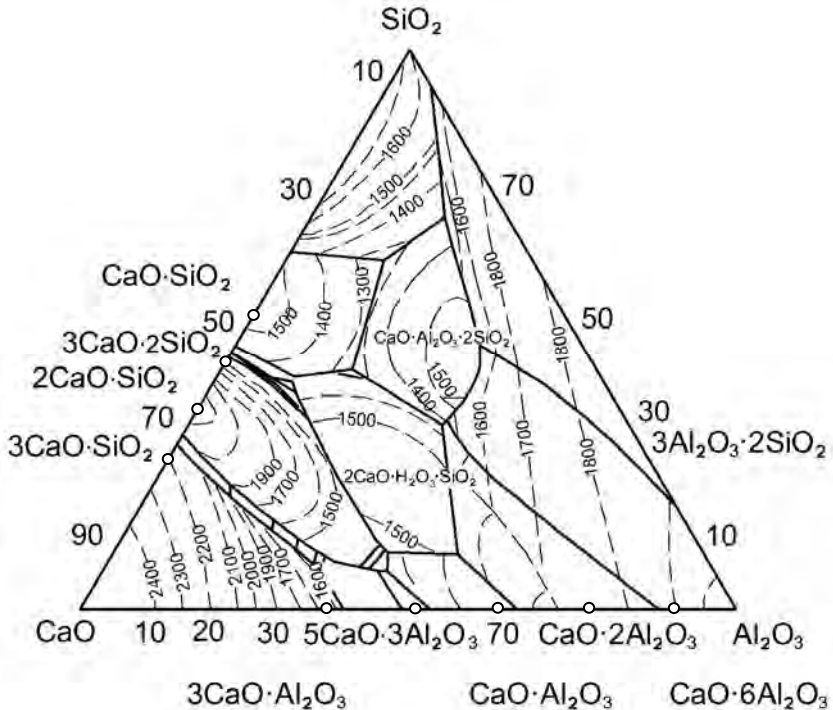


**Рис. 4.7.** Диаграмма состояния системы

В производстве силикатных строительных материалов важное место принадлежит таким тройным системам, как  $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ . Система  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  широко используется в огнеупорной, цементной и керамической промышленности. Диаграмма состояния этой системы представлена на рис. 4.7. В системе имеется 15 химических соединений, из которых три – простые оксиды, два – тройные, остальные – би-

#### 4. Основание составов и технологических параметров

нарные соединения. Тройными (т.е. включающими три оксида) соединениями являются *анортит*  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  и *геленит*  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  (температуры плавления соответственно 1553 и 1593°C). Анортит – минерал, который часто встречается в горных породах, а геленит – в разных металлургических шлаках.

Среди двойных соединений особенно важными являются  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – минералы портландцементного клинкера;  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  – основной минерал глиноземистого цемента;  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  – муллит, входящий в керамические изделия и придающий им огнеупорность, повышенные электроизоляционные свойства и т.п.

На диаграммах тройных систем отмечают температуры плавления чистых компонентов, а также двойных и тройных эвтектик. Для определения температур кристаллизации на диаграмму наносят изотермы – линии одинаковой температуры.

### 4.2. Моделирование в исследованиях строительных материалов

В строительном материаловедении моделирование традиционно используется как один из основных методов исследования. Уже первые образцы для определения свойств материалов являлись их физическими моделями, а первые эмпирические зависимости – математическими моделями. По мере развития технологии получения строительных материалов с заданными свойствами, физических и кибернетических методов исследования и технических средств для их реализации значение моделирования неуклонно возрастает.

К наиболее общим определениям модели относится определение акад. В.С. Немчинова: “*Модель* есть средство выделения какой-либо объективно действующей системы закономерных связей и отношений, имеющих место в изучаемой реальной действительности”.

Предложено множество классификационных схем моделей. При исследовании материалов их вещественный состав может моделироваться субстанциональными, структура – структурными, а поведение – функциональными моделями. *Субстанциональные* модели рассматривают сам материал (субстанцию) по его основным свойствам. Так, образец для лабораторных испытаний, имея обычно значительно меньшие размеры, чем конструкция или изделие, мо-



делирует материал в этих объектах по основным свойствам. *Структурные* модели имитируют отдельные признаки структуры материалов или их сочетание (взаимное расположение структурных элементов на микро- и макроуровнях, способы укладки зерен, размещение пор и дефектов, механизм формирования структурных блоков и др.) (рис. 4.8).

На *функциональных* моделях изучается поведение материала в определённых условиях. Типичным примером функциональных являются реологические модели материалов. Например, в основе модели пластично-вязкого материала (рис. 4.9) лежит представление о том, что его поведение под нагрузкой аналогично поведению последовательно соединенной пружины и поршня,двигающегося в вязкой жидкости.

Все модели условно подразделяют на два класса – физические и математические.

*Физическое* моделирование основано на использовании принципов подобия. Простейшим видом подобия является геометрическое, основанное на использовании параметров, сохраняющих неизменное значение в модели и натуре – т.н. коэффициентов подобия.

Различают полное и неполное подобие. В последнем случае рассматривают подобие объектов, например, только во времени или в пространстве. Приближенное подобие связано с некоторыми упрощающими допущениями, заведомо известными и оцениваемыми количественно на основании аналитических или экспериментальных исследований. Подобие может быть установлено для явлений, которые подчиняются как детерминированным законам, так и ста-

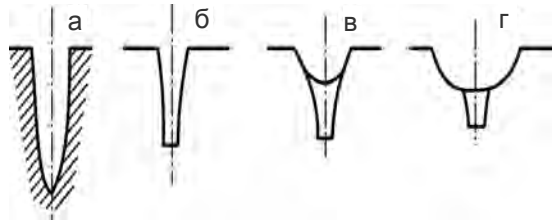


**Рис. 4.8.** Модели трещин в твердых материалах:

а – по Гриффитсу; б – по П.А. Ребиндеру; в – по представлениям Г.М. Бартенева, И.В.Разумовской, П.А. Ребиндера: а, б, в – модели трещин в идеально хрупком материале; г – трещина в реальном твердом материале (по Г.М. Бартеневу)

#### 4. Основание составов и технологических параметров

статистическим закономерностям. В последнем случае говорят о наличии статистического подобия.

Все виды подобия подчиняются общим закономерностям, описываемым теоремами подобия. Для подобных явлений можно выделить некоторые соотношения параметров или критерии подобия ( $\pi$ ), которые численно одинаковы, т.е.:

$$\pi = \text{idem} \quad (4.11)$$

(“idem” – от латинского – “то же”).

В виде зависимости между критериями подобия можно записать

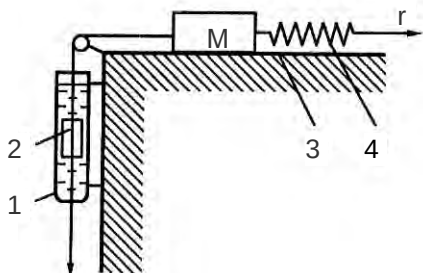


**Рис. 4.9.** Модель пластично-вязкого тела (Бингама-Шведова):

- 1 – цилиндр; 2 – поршень;
- 3 – стол; 4 – пружина

полное уравнение физического процесса и распространить результаты исследований на целый ряд подобных объектов.

*Математическое* моделирование основано на использовании системы формул, уравнений, неравенств и т.д., отражающих существенные свойства изучаемого объекта или явления.

Математические модели можно объединить в две груп-

пы – детерминированные и стохастические или вероятностные.

В *детерминированных* моделях входные параметры  $x_1, x_2 \dots x_m$  связаны с выходными  $y_1, y_2 \dots y_n$  системой функциональных уравнений:

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1(x_1, x_2 \dots x_m), \\ y_2 &= f_2(x_1, x_2 \dots x_m), \\ &\dots \dots \dots \\ y_n &= f_n(x_1, x_2 \dots x_m). \end{aligned} \quad (4.12)$$

В детерминированных моделях отражается жесткая причинно – следственная связь, их построение возможно при достаточно полном теоретическом и экспериментальном изучении системы, они обычно пригодны для описания сравнительно простых явлений и имеют ограниченное применение.

Наибольшие возможности в материаловедческих исследованиях представляют *стохастические* модели, при построении которых используются кибернетические представления о т.н. “черном” или “сером” ящиках, различаемых так в зависимости от отсутствия или

наличия определенных предварительных сведений о виде модели объекта (рис. 4.10). Для систем “черного” и “серого” ящиков неизвестна внутренняя структура, задача моделирования заключается в том, чтобы исследовать изменение параметров “выхода”  $Y$  при изменении параметров (факторов) “входа”  $X$  и получить уравнения связи, используя их для установления и анализа их причинно следственной природы, оптимизации рецептурно-технологических решений. Кроме факторов  $X$  на входе выделяются также неуправляемые факторы  $Z$ , которые в процессе исследования лишь контролируются, и неконтролируемые факторы  $U$  которые относятся к “возмущающим воздействиям” на объект исследования.

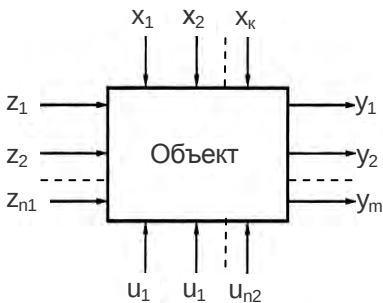


**Рис. 4.10.** Схематическое представление объекта исследования в виде "черного ящика"

Стохастические модели получают с применением экспериментально – статистических методов, обрабатывая данные “пассивного” или “активного” эксперимента. При “пассивном” эксперименте проводят опыты с поочередным варьированием каждого фактора или собирают необходимый статистический материал, не проводя специальных опытов. “Активный” эксперимент ставится по заранее составленному плану (*планирование эксперимента*), при этом предусматривается из-

менение всех изучаемых факторов.

Активный многофакторный эксперимент имеет ряд преимуществ. Он позволяет за счет выбора оптимального плана существенно уменьшить объем экспериментальных работ. При планировании экспериментов математическим методом отводится активная роль на всех этапах исследования: при формализации априорной информации, при выполнении опытов и обработке их результатов, поиске оптимального решения (рис. 4.11).

Обработка полученных данных проводится с помощью корреляционного и регрессионного анализов. Простейшим уравнением парной связи между изучаемым параметром  $y$  и определенным фактором  $x$  является линейное уравнение вида:

$$y = b_0 + b_1x. \quad (4.13)$$

Простейшей формой выражения множественной корреляции между параметром  $y$  и факторами  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , является линейная зависимость вида:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n. \quad (4.14)$$

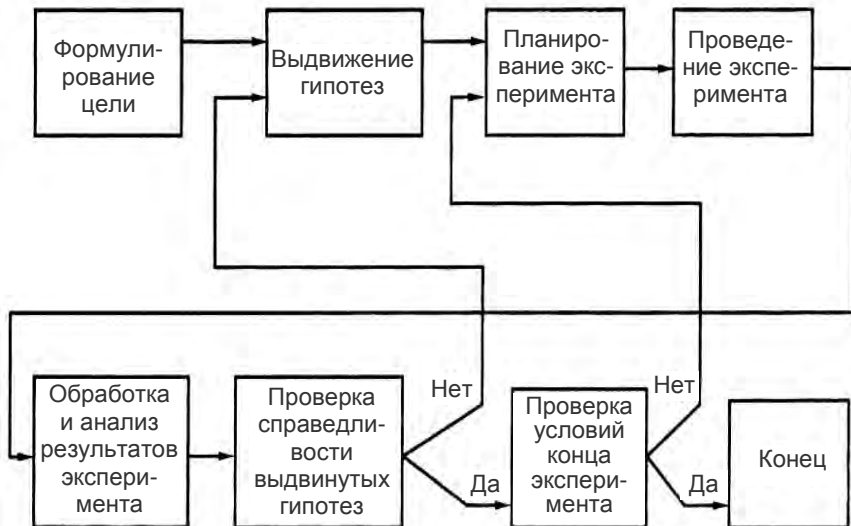


**Рис. 4.11.** Стратегия построения математической модели

Корреляционные связи могут быть выражены и нелинейными зависимостями, а также произведением некоторых функций, каждая из которых выражает связь лишь с одним переменным.

Если корреляционный анализ позволяет найти силу связи между переменными, то регрессионный – получить уравнение, определить значимость коэффициентов и установить его адекватность. Регрессионный анализ базируется на гипотезе, что связь между параметрами может быть описана непрерывной функцией, разлагаемой в ряд Тейлора. Получаемое при этом полиномиальное уравнение регрессии имеет общий вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_{i1}x_i + \sum_{i=1}^n b_{i2}x_i^2 + \sum_{\substack{i \neq j \\ i,j=1}}^n b_{ij}x_ix_j + \dots, \quad (4.15)$$

где  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ii}$ ,  $b_{ij}$  – коэффициенты уравнения, характеризующие силу влияния исследованных факторов и эффекты их взаимодействия.

Коэффициенты уравнения регрессии определяются методом наименьших квадратов, при котором минимизируется сумма квадратов разностей  $\Delta_u$  между экспериментальными значениями  $\bar{y}_u$  и рассчитанными по модели значениями  $\hat{y}_u$ :

$$\sum_{u=1}^N \Delta_u^2 = \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2 \rightarrow \min, \quad (4.16)$$

где  $N$  – объем выборки.

Проверка гипотезы об адекватности модели проводится с помощью статистического анализа сопоставлением точности модели с величиной, характеризующей точность выполненных опытов. В моделях факторы  $x_i$  учитываются обычно в кодированном (безразмерном) виде:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i_0}}{\Delta X_i}, \quad (4.17)$$

где  $X_i$  – натуральное значение  $i$ -го фактора;  $X_{i_0}$  – натуральное значение  $i$ -го фактора на нулевом (основном) уровне;  $\Delta X_i$  – шаг варьирования.

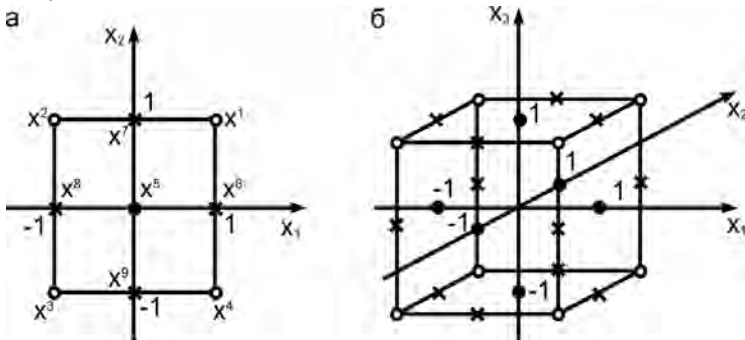


**Рис. 4.12.** Точки непрерывного D-оптимального плана Кифера на кубе при числе факторов  $n=2$  (а) и  $n=3$  (б) для выполнения экспериментов и построения квадратичных моделей

В настоящее время разработано большое число типовых планов для построения линейных и квадратичных моделей (рис. 4.12), а

#### 4. Основание составов и технологических параметров

---

также компьютерных программ, позволяющих полностью обработать исходные данные, выполнить необходимый анализ.

С применением полиномиальных моделей можно решать большой комплекс задач проектирования оптимальных составов и структуры материалов с заданными свойствами, технологических параметров, обеспечивающих заданные условия оптимальности.

В.А. Вознесенский сформулировал и методически разработал 10 типов задач, решаемых индивидуально или совместно на основе одной полиномиальной модели и позволяющих определить:

1. Значения выходного параметра ( $Y$ ) для расположенной внутри области изученного факторного пространства точки с координатами, отличными от точек плана эксперимента (интерполяционная задача);

2. Значения  $Y$  для точки, расположенной вне области изученного факторного пространства (экстраполяционная задача);

3. Геометрическую фигуру (поверхность отклика), описываемую моделью (аналитико-геометрическая задача);

4. Минимально возможное значение  $Y$  в зоне эксперимента (минимизация выхода  $Y$ );

5. Максимально возможное значение  $Y$  в зоне эксперимента (максимизация выхода  $Y$ );

6. Возможные соотношения между значениями факторов в зоне эксперимента для требуемого уровня  $Y$  (управление при фиксированном  $Y$ );

7. Минимальные значения факторов, характеризующих расход ресурсов при заданном уровне качества объекта (минимизация ресурсов  $X_i$  при фиксированном  $Y$ );

8. Данные для построения регулировочных диаграмм для  $Y$  при двух переменных и одном фиксированном факторах (управление  $Y$  при двух переменных факторах);

9. Данные для построения однофакторных моделей, описывающих влияние каждого фактора на  $Y$  (управление  $Y$  при одном переменном факторе);

10. Эффект влияния каждого фактора на величину  $Y$  (оценка роли факторов  $x_i$ ).

Ниже приведен пример решения с помощью модели одной из возможных интерполяционных задач.

Комплекс разнообразных задач можно решать совместным анализом полиномиальных моделей.

**Пример.** Для регулирования цементно-водного отношения (Ц/В) бетонной смеси, необходимого для получения бетона с определенной прочностью при сжатии ( $R_6$ ) в зависимости от водопотребности (В), расхода пластифицирующей добавки ЛСТ (Д) и активности цемента ( $R_{ц}$ ) требовалось получить математическую модель и построить по ней расчетную номограмму. При изменении указанных факторов в желаемом диапазоне ( $Ц/В = 1.5-3.5$ ,  $В = 160-220 \text{ кг/м}^3$ ,  $R_{ц} = 49.4-68.1 \text{ МПа}$ ,  $Д = 0-0.5\%$ ) выполнены эксперименты в соответствии с планом, позволяющим получить при 4-варьируемых факторах квадратичную полиномиальную модель. После необходимого статистического анализа, позволившего найти значения соответствующих коэффициентов и оценить адекватность уравнения регрессии, получена полиномиальная математическая модель:

$$y = 57,3 - 1,6x_1 + 22,9x_2 + 7,2x_3 - 1,6x_4 - 0,4x_1^2 - 1,6x_2^2 - 0,4x_3^2 - 2,8x_4^2 + 2,5x_2x_3, \quad (4.18)$$

где  $x_1 = (В - 190)/30$ ;  $x_2 = (Ц/В - 2,5)/1$ ;  $x_3 = (R_{ц} - 58,75)/9,35$ ;  
 $x_4 = (Д - 0,25)/0,25$ .

После выполнения необходимых расчетов с помощью полученной математической модели построена требуемая номограмма (рис. 4.13).

К числу основных материаловедческих задач относятся задачи построения и исследования диаграмм “состав – свойства” для многокомпонентных смесей. При планировании эксперимента в смесевых системах необходимо учитывать, что при выражении составов смесей концентрациями  $x_i$  отдельных компонентов справедливо условие:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1. \quad (4.19)$$

Диаграммы “состав – свойство”, как и диаграммы состояния силикатных систем, принято представлять в координатах *симплекса*, т.е. выпуклой фигуры, образованной множеством  $(m+1)$  независимых точек в  $m$ -мерном пространстве и имеющей минимальное количество вершин. На плоскости это треугольник (рис. 4.14), в 3-мерном пространстве – тетраэдр и т.д. Задача планирования эксперимента сводится к тому, чтобы оптимально расположить экспериментальные точки на симплексе. С этой целью обычно применяют специальные планы выполнения экспериментов.

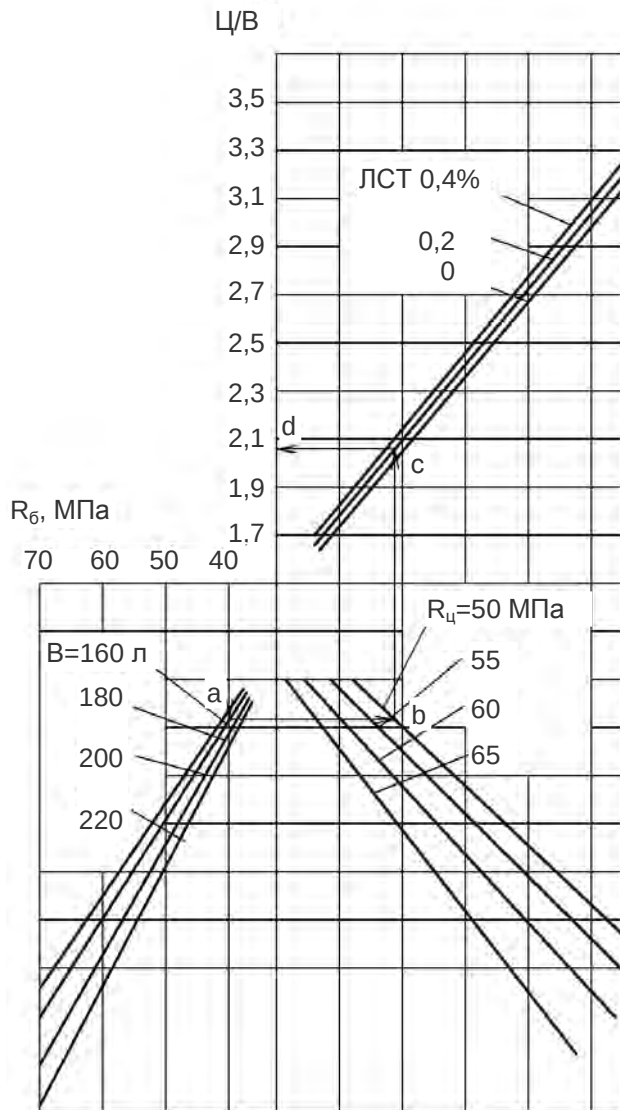


**Рис. 4.13.** Номограмма для определения цементно-водного отношения ( $\text{Ц/В}$ ) при получении бетона требуемой прочности ( $R_b$ ) в зависимости от водосодержания бетонной смеси ( $B$ ), активности цемента ( $R_{\text{ц}}$ ) и содержания добавки ЛСТ



Для описания смесевых систем используют приведенные полиномы типа:

$$y = \sum_1^m b_i x_i + \sum_{i < k} b_{ik} x_i x_{kij} . \quad (4.20)$$

**Пример:** Требовалось получить математическую модель, описывающую влияние на прочность вибропрессованного бетона зернового состава наполнителя, включающего три фракции  $v_1=0,315-0,16$  мм,  $v_2=0,16-0,08$  мм и  $v_3<0,08$  мм.

После выполнения опытов с использованием специального плана (симплекс-решетчатого плана Шеффе) и обработки экспериментальных данных получена математическая модель прочности бетона  $R_{сж}$  в виде уравнения регрессии:

$$R_{сж} = 28,9v_1 + 36,9v_2 + 39,2v_3 + 9,4v_1v_2 - 3,8v_2v_3 + 10,2v_1v_2v_3, \quad (4.21)$$

где  $v_1, v_2, v_3$  – содержание соответствующих фракций наполнителя в бетоне, которое колеблется от 0 до 100% от общего количества наполнителя.

Состав бетона: цемент – 300 кг/м<sup>3</sup>, заполнитель – 1750 кг/м<sup>3</sup>, водо-цементное отношение – 0,52-0,55. Содержание наполнителя – 40% от массы заполнителя.

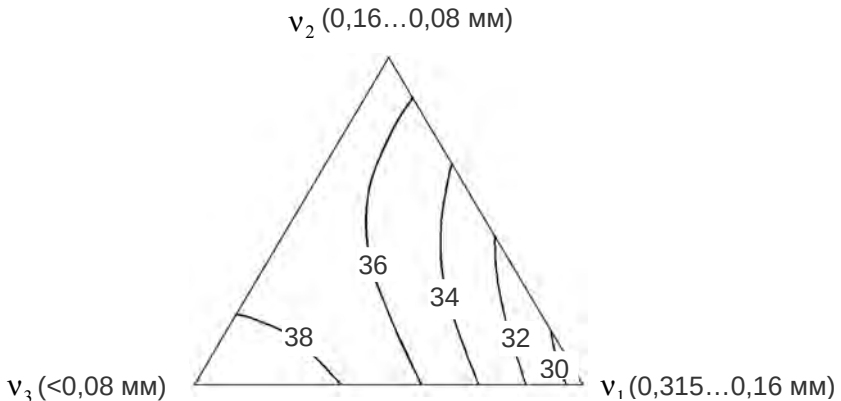


**Рис. 4.14.** Изолинии при сжатии, МПа вибропрессованного бетона в зависимости от содержания фракций наполнителя

На треугольной диаграмме (рис.4.14) приведены изолинии прочности бетона, МПа в зависимости от объемного содержания трех фракций наполнителя.

Целью математического моделирования часто является не только описание исследуемой системы, но и определение условий достижения ею некоторых оптимальных показателей.

При исследовании материалов критериями оптимальности или эффективности могут являться показатели их свойств, технико-экономические или технологические параметры их получения (табл.4.1). Задача оптимизации заключается в достижении максимально или минимально возможного значения критерия оптимальности, который может задаваться при определенных ограничениях (по расходу ресурсов, технологическим параметрам и др.) (рис.4.15...4.16). В некоторых случаях возможно применение обобщенного критерия оптимизации ( $K_0$ ), математическая модель которого имеет вид:

$$K_0 = \sum_i a_i x_i, \quad (4.21)$$

где  $x_i$  – частные показатели эффективности;  $a_i$  – коэффициент, который учитывает сравнительную значимость  $i$ -го показателя в модели  $K_0$ :

$$\sum_i a_i = 1. \quad (4.22)$$

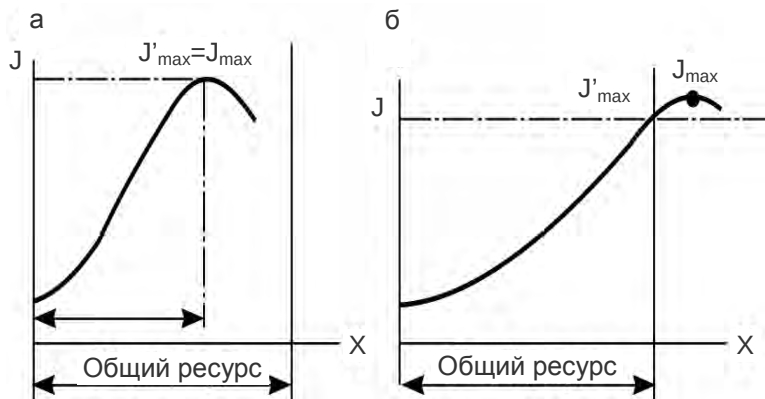


**Рис. 4.15** Типы задач оптимизации (по В.А.Вознесенскому):  
 а – достижение заданного уровня критерия эффективности ( $J$ ) при минимальном расходе ресурсов; б – достижение максимального уровня критерия эффективности при полном расходе выделенных для достижения цели ресурсов

При двух или нескольких критериях эффективности, если они однозначно не связаны корреляционной связью невозможно одновременное достижение их экстремальных значений и оптимальные решения лежат в компромиссной зоне влияния факторов (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Некоторые критерии оптимальности при проектировании составов и структуры материалов

|                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Показатель свойства (комплекса, соотношения свойств) материала ( $P_i$ ):<br>$P_i \rightarrow \max(\min),$                                                                                |
| Отношение показателей свойства для данного материала ( $P_i$ ) и материала эталонного состава (структуры) ( $P_o$ ):<br>$P_i/P_o \rightarrow \max(\min) \cdot$                            |
| Отношение показателей свойства материала ( $P_i$ ) к удельному расходу материального или энергетического ресурса, необходимого для его изготовления ( $X$ ):<br>$P_i/X \rightarrow \max,$ |
| Удельный расход ресурса<br>$X \rightarrow \min.$                                                                                                                                          |
| Отношение удельного расхода ресурса к показателю свойства материала:<br>$X/P_i \rightarrow \min.$                                                                                         |
| Удельный стоимостной показатель*:<br>$C \rightarrow \min,$                                                                                                                                |
| Отношение удельных стоимостных показателей для данного материала и материала эталонного состава (структуры) ( $C_o$ )*:<br>$C/C_o \rightarrow \min.$                                      |
| Отношение удельных стоимостных показателей и показателей свойств (или наоборот)*:<br>$C/P_i \rightarrow \min$ (или $P_i/C \rightarrow \max$ ).                                            |

**Примечание.\*** – Критерий оптимальности предполагает во всех случаях обязательное достижение всех заданных свойств материала.

При решении задач подбора оптимальных составов многокомпонентных смесей часто ставится требование определить соотношение компонентов, позволяющее достичь не экстремальные, а заданные по-

#### 4. Основание составов и технологических параметров

казатели свойств материала при минимизации расхода лимитируемого ресурса. Для таких задач последний является критерием оптимизации и желательно получение его математической модели, описывающей влияние на критерий изучаемых факторов. Примером задач этого рода является проектирование составов бетона с заданными свойствами при минимальном расходе цемента. При решении этой задачи рассматриваются возможности уменьшения расхода цемента при обеспечении заданных показателей удобоукладываемости бетонной смеси, прочности и других свойств бетона. Для заданных условий в изучаемой системе анализируются на одной или

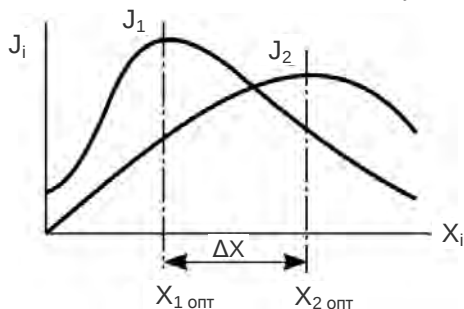


**Рис. 4.16.** Изменение критериев эффективности и зона компромиссных решений

нескольких математических моделях взаимосвязи: - расход цемента ( $\Pi$ ) – водоцементное отношение ( $B/\Pi$ ) – расход воды ( $B$ ) – зерновой состав заполнителей и др. – и выбирается оптимальное решение.

Все более широко в исследовательской и технологической практике применяется *системный*

*анализ*, включающий всестороннее количественное сравнение альтернатив и выбор оптимальных решений при широком применении математического моделирования и ЭВМ. Системный анализ целесообразен при более широкой, чем обычно постановке задач, например, когда требуется подобрать оптимальный состав бетона с одновременной оценкой оптимальности требований к нему. Для таких задач предпочтительно использование стоимостных критериев оптимальности (себестоимости, приведенных затрат, прибыли и др.).

При проектировании оптимальных составов бетона с применением системного анализа, на первом этапе определяют оптимальные составы бетона, обеспечивающие комплекс требуемых свойств при некоторых заданных проектных параметрах, а на последующих выполняют оптимизацию вида исходных материалов

и проектных параметров с соответствующим корректированием составов. Для каждого этапа задачи формулируют критерии оптимальности и ограничения. Простейший критерий оптимальности – минимальный расход цемента, наиболее сложный – минимальные удельные затраты на конструкцию (сооружение) “в деле” т.е. с учетом затрат на изготовление, транспортирование и монтаж. Минимизация общих затрат не всегда ведет к минимизации расхода цемента. Такие ситуации характерны в случае выбора составов бетона с одновременным выбором вида и марки цемента, добавок, режимов перемешивания, тепловой обработки и др.

Разработано множество математических методов оптимизации. Преимущественно для детерминированных систем с критерием оптимальности в виде дифференцируемых функций применяют аналитический поиск экстремума, при этом в задачах с ограничениями используют метод множителей Лагранжа. Системы, описываемые линейными алгебраическими уравнениями с критериями оптимальности в виде линейных функций, оптимизируют с помощью линейного программирования, а многостадийные процессы с критериями оптимальности в виде аддитивных функций – динамического программирования. Для оптимизации сложных объектов химической технологии в настоящее время применяют самонастраивающиеся адаптивные алгоритмы оптимизации, реализуемые с помощью автоматических устройств.

Для статистических объектов, не имеющих детерминированного описания, применяют методы крутого восхождения, диссоциативно-шаговый метод и др.

## 5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПОЛУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Получение строительных материалов осуществляют с применением комплекса технологических процессов – дробления, тонкого измельчения, плавления, обжига, тепловлажностной обработки и др. При получении, а затем и в процессе эксплуатации материалов в конструкциях и сооружениях протекают химические и физико-химические процессы активно влияющие на состав, структуру и свойства материалов.

### 5.1 Физико-химические процессы

К важнейшим физико-химическим процессам, идущим при получении основных строительных материалов, являются процессы растворения, гидратации, коагуляции, полимеризации, кристаллизации, спекания. В зависимости от вида материалов решающими являются те или иные процессы. Например, для искусственных каменных материалов, полученных при твердении минеральных вяжущих, основными являются процессы гидратации и кристаллизации новообразований, а для органических вяжущих – полимеризации и поликонденсации.

Формирование керамических материалов определяется пиросиликатными реакциями процессов спекания, металлов – процессами плавления и кристаллизации.

*Растворением* твердого тела в жидкости называют его разрушение под действием растворителя с образованием раствора – гомогенной системы, состоящей из растворителя и молекул или ионов, которые перешли в него. При химическом взаимодействии растворителя с растворяемым веществом, образуются сольватные соединения (если растворитель – вода, то гидратные), и в этих случаях практически невозможно выделить растворенное вещество из раствора кристаллизацией. В случае, если нет химического взаимодействия, может происходить обратная кристаллизация растворенного вещества. Способность вещества растворяться при контакте с растворителем зависит от изменения энергии Гиббса  $\Delta Z$ . Растворимыми являются только вещества, которые имеют  $\Delta Z < 0$ . В противном

случае энергия, которую можно получить от изменения энтальпии и энтропии, недостаточна для разрушения кристаллической решетки растворимого вещества. Мерой растворимости вещества служит концентрация насыщенного раствора. Растворимость большинства веществ с повышением температуры возрастает, но она может и уменьшаться (рис. 5.1). Существуют также пересыщенные растворы, которые являются нестабильными, поскольку не находятся в термодинамическом равновесии с твердой фазой.

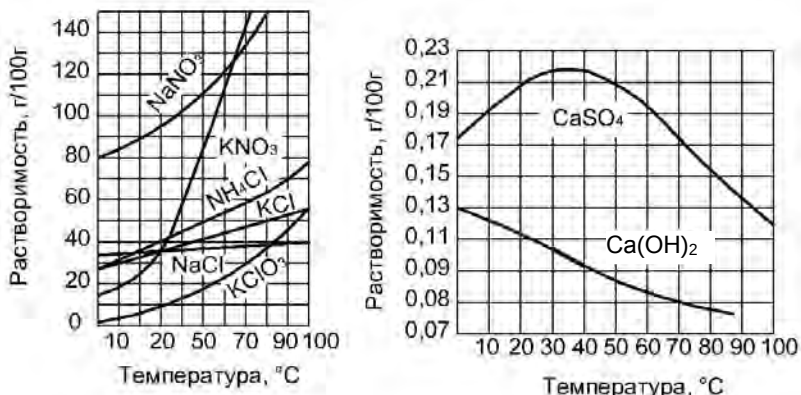


**Рис. 5.1.** Влияние температуры на растворимость некоторых веществ

Общее уравнение скорости растворения имеет такой вид:

$$-dm/Fd\tau = k(C_0 - C), \quad (5.1)$$

где  $m$  – масса растворенного продукта;  $F$  – площадь поверхности кристаллов;  $\tau$  – время;  $k$  – коэффициент скорости растворения;  $C_0$  – концентрация насыщенного раствора при определенной температуре;  $C$  – концентрация растворенного продукта в жидкой фазе.

При растворении твердых тел образуются истинные или коллоидные растворы. *Истинный раствор* характеризуется гомогенным распределением частичек молекулярного или ионного размера. К *коллоидным растворам* принадлежат системы с размером частичек дисперсной фазы 1-100 мкм. Необходимыми условиями для образования коллоидных растворов являются достаточно низкая растворимость дисперсной фазы и наличие веществ, стабилизирующих коллоидные частички. На основе частичек ионного или молекуляр-

ного размера могут получаться коллоидные частички за счет полимеризации или поликонденсации.

Процессы *гидратации* в соответствии с современными представлениями происходят, главным образом, вследствие химического взаимодействия предварительно растворенного вещества с водой (гидратация через раствор). Реакции гидратации и реакции гидролитической диссоциации, которые часто их сопровождают, можно описать такими схемами:

$A + aq \rightarrow Aaq$ ;  $A + aq \rightarrow A'aq + A''aq$ ;  $A + B + aq = ABaq$ , (5.2)  
где A, A', A'', B – гидратируемые и гидратированные компоненты; aq – вода.

Термодинамически возможна гидратация и в твердой фазе без предшествующего растворения исходного вещества (*топохимический процесс*).

Растворение и гидратация – важнейшие процессы, которые предопределяют твердение минеральных вяжущих веществ. Протекание топохимического или жидкофазового процессов зависит от условий и прежде всего от водотвердого отношения. Размер частичек продуктов гидратации изменяется от коллоидных к кристаллам, которые можно наблюдать под микроскопом. Образование преимущественно коллоидных продуктов гидратации характерно для портландцемента и автоклавных материалов, кристаллических продуктов – для гипсовых и магнезиальных вяжущих.

В высококонцентрированных дисперсных системах с развитой межфазовой поверхностью возникают пространственные коагуляционные структуры (рис. 5.2). Для гидратационных и поликонденсационных или полимеризационных вяжущих такие структуры являются промежуточными, для вяжущих коагуляционного типа – основными. Так, в глиняных суспензиях дисперсные глинистые частички – *мицеллы* заряжены отрицательным зарядом, который предотвращает их сцепление. После потери заряда (высыхании) частички глины слипаются и коагулируют. Образованные во время коагуляции гели с течением времени теряют воду и перекристаллизуются.

Мицеллярные коллоидные структуры образуют также органические вяжущие – битумы, Твердая часть (асфальтены) битумов, покрытая оболочками смол, образует мицеллы, суспензированные в



маслах. Стабильность системы зависит от поверхностного взаимодействия между мицеллами и дисперсионной средой – маслом.

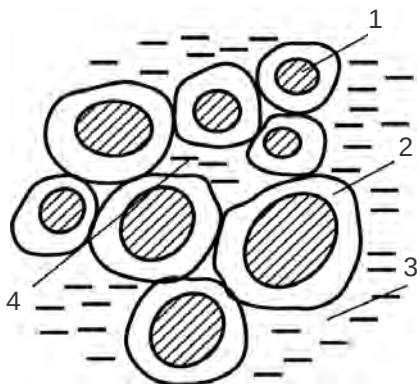


**Рис. 5.2.** Схема коагуляционной структуры цементного теста (по Ю.М. Баженову):

1 – зерно цемента; 2 – сольватная оболочка; 3 – свободная вода; 4 – “защемленная” (“неподвижная”) вода

Для твердых битумов при температуре 20-25°C характерна коагуляционная структура – гель, обусловленная повышенным содержанием асфальтенов. Для битумов жидкой консистенции с повышенным содержанием смол и масел более характерна структура – золь. Структура битумов под действием температур обратимо изменяется. Под влиянием кислорода воздух в битуме происходит окисление (полимеризация и поликонденсация), что приводит к

переходу его в хрупкое состояние (старение).

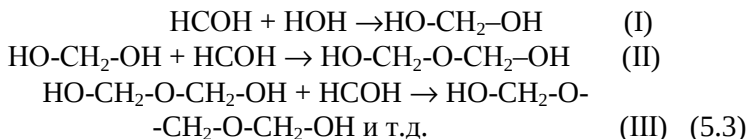
В основе формирования полимерных материалов лежат процессы полимеризации и поликонденсации. *Полимеризацией* называют реакцию соединения низкомолекулярных продуктов – мономеров между собою без образования побочных продуктов. Мономерами, которые вступают в реакцию полимеризации, наиболее часто бывают соединения с кратными связями (двойными, тройными) или циклические. В первом случае полимеризация происходит вследствие раскрытия кратной связи под влиянием энергетического воздействия, во втором – в результате размыкания циклов.

Полимеризация может происходить по цепному или ступенчатому механизму. Цепная полимеризация характеризуется тремя стадиями:

- возбуждение мономера  $M$  с образованием активных радикалов  $M^*$ :  $M \rightarrow M^*$ ;
- Срастания цепи:  $M^*_{n-1} + M \rightarrow M^*_n$ ;
- Обрыв цепи:  $M^*_n \rightarrow P_n$ , где  $P_n$  – молекула полимера.

Возбуждение мономеров можно вызвать нагреванием, действием лучей, токов высокой частоты или излучением, применением инициаторов и катализаторов.

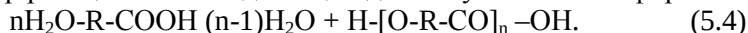
При ступенчатой полимеризации реакция происходит постепенным присоединением молекул одна к одной за счет миграции подвижных атомов. Например, образование полимера из формальдегида происходит по схеме:



Полимеризацию можно осуществлять блочным способом, в эмульсии и в суспензии.

*Поликонденсация* – это реакция образования полимеров, которое сопровождается выделением низкомолекулярных веществ (воды, аммиака, хлорида водорода и т.п.). При этом масса полимера, которую получают, в отличие от полимеризации меньше массы исходных веществ, а его элементарный состав не совпадает с элементарным составом соединений, которые вступают в реакцию.

Пример реакции поликонденсации для получения полиэфиров:



Поликонденсация происходит ступенчато, ее можно проводить в расплаве, растворе, эмульсии, суспензии, твердой фазе, как с катализаторами, так и без них.

В перенасыщенных растворах минеральных вяжущих материалов при их твердении происходят процессы *кристаллизации*. Они могут проходить также и при структурообразовании полимерных соединений. Способность полимеров к кристаллизации определяется их химическим составом. Степень кристаллизации большинства полимеров составляет от 10 до 90 %. Кристаллизационные процессы разделяют на элементарные процессы возникновения зародышей кристаллов и их роста.

По теории Гиббса зародыши кристаллизации возникают, если в метастабильной системе (пересыщенный раствор, переохлажденная жидкость) имеются центры кристаллизации (коллоидные вкрапления, посторонние частички и т.п.).

Вероятность самопроизвольного образования зародышей ( $p$ ) описывают уравнением:

$$p = e^{-\Delta U / kT}, \quad (5.5)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $\Delta U$  – изменение свободной энергии между твердой и жидкой фазами.

Наличие центров кристаллизации приводит к уменьшению  $\Delta U$  за счет снижения энергии поверхности раздела фаз. Если центров кристаллизации сравнительно немного, то образуется крупнокристаллическая структура материалов, а если много, то – мелкокристаллическая. Регулирование количества центров кристаллизации за счет, например, введения специальных добавок (затравок) дает возможность соответственно регулировать особенности структуры материалов.

Рост кристаллов обеспечивается доставкой растворенного материала. Скорость роста кристаллов:

$$v = (k_D S / \Delta)(C_n - C_n), \quad (5.6)$$

где  $k_D$  – коэффициент диффузии;  $S$  – площадь поверхности кристалла;  $\Delta$  – толщина диффузного слоя;  $C_n - C_n$  – разность концентрации пересыщенного раствора и концентрации на поверхности кристалла.

Мелкокристаллическая структура материала образуется при условии:

$$v_1 \geq v_2, \quad (5.7)$$

где  $v_1$  – скорость образования зародышей;  $v_2$  – скорость роста кристаллов.

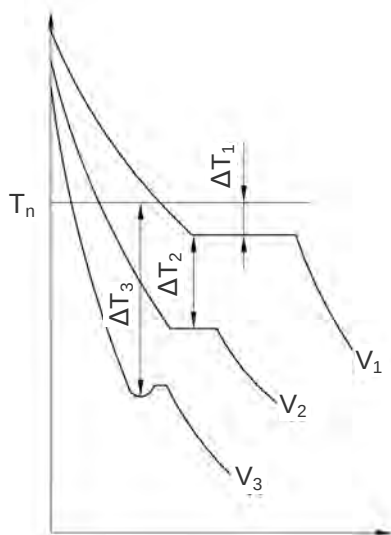
Применение добавок поверхностно-активных веществ дает возможность за счет избирательной адсорбции замедлить рост кристаллов и модифицировать их.

Увеличение механической прочности строительных материалов в процессе твердения обусловлено образованием кристаллических сростков. По П.А. Ребиндеру структура твердения развивается в два этапа:

- формирование каркаса кристаллической структуры с образованием контактов срастания;
- обрастание каркаса без возникновения новых контактов.

Кристаллические контакты между частичками возникают, если они приближаются одна к одной при тепловом движении и диффузии на расстояние не больше толщины удвоенного адсорбционного

слоя из молекул гидрата. На прочность твердеющих материалов особенно влияют величина и кинетика пересыщения жидкой фазы.



Длительность охлаждения

**Рис. 5.3.** Кривые охлаждения металла при кристаллизации:

$V$  – скорость охлаждения;

$T_n$  – температура плавления

Процессы кристаллизации происходят не только в пересыщенных растворах при твердении вяжущих, а и при формировании разных материалов из расплавленных масс – горных пород, стекла, шлаков, металлов. Кристаллизация из расплавов протекает при температуре более низкой, чем равновесная. На термодинамической кривой при температуре кристаллизации наблюдается горизонтальная площадка, образование которой объясняется выделением скрытой теплоты кристаллизации (рис. 5.3). При условии свободного роста кристаллы имеют правильную форму. Обычно во время кристаллизации материалов затруднение свободного доступа питательной жидкости к кристаллам обуславливает их неправильную форму (рис. 5.4). Такие кристаллы, которые образуют материалы, называют *кристаллитами*, или зернами. Размер зерен, определяемый соотношением скорости образования зародышей и их роста, существенно влияет на свойства материалов. Например, для металлов вязкость и пластичность значительно выше при мелкозернистой структуре.

В растущих кристаллах всегда имеются дислокации. На поверхности винтовой дислокации существует ступенька, к которой легко присоединяются атомы, вследствие чего на поверхности кристаллов появляются спирали роста высотой до нескольких тысяч атомов. Кристаллизация расплавов может замедляться и практически останавливаться при высокой вязкости расплава, а также при больших размерах молекул или структурных групп, которые образуют рас-

плав. В обоих случаях для расплава характерен низкий коэффициент диффузии, определяемой зависимостью:

$$k_D = RT/(6\pi N r \eta), \quad (5.8)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $N$  – число Авогадро;  $r$  – радиус молекул;  $\eta$  – вязкость.

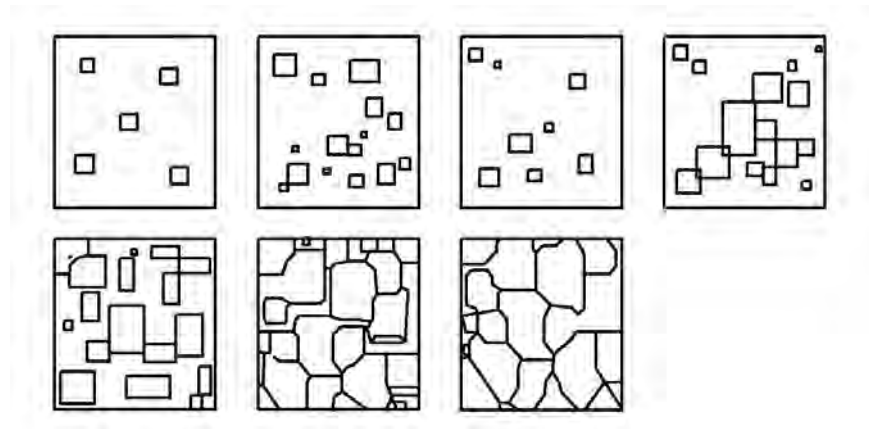


**Рис. 5.4.** Схема кристаллизации металла

Если коэффициент диффузии низкий, а температуры, соответствующие интенсивному образованию зародышей и значительной скорости роста кристаллов, существенно отличаются, то расплав отвердевает в стекловидном состоянии. Наиболее характерно стекловидное состояние, наблюдаемое при быстром охлаждении силикатных расплавов. Стекло можно рассматривать как переохлажденную жидкость, оно по структуре более близко к расплавам, чем к твердым телам.

*Стекло* – нестабильная форма состояния материалов и при определенных воздействиях, например обжиге, оно может кристаллизоваться. Процесс кристаллизации стекла экзотермический. Кристаллизационная способность стекла зависит от его химического состава. Например, кристаллизации силикатного стекла препятствует наличие в небольших количествах одновременно  $MgO$  и  $Al_2O_3$ , а ускоряет – введение фтора.

На кристаллизационной способности стекла определенного состава основано получение стеклокристаллических материалов – *си-*

таллов, которые имеют особенно высокие механические свойства и стойкость.

Для керамических и ряда других обжиговых материалов структура формируется при *спекании*, которое происходит при высоких температурах, сопровождается усадкой и резким увеличением прочности.

Спекание обусловлено преимущественно избыточной свободной поверхностной энергией системы. При уменьшении этой энергии возникает капиллярное давление (лапласовские силы), под действием которого образуются контакты между частицами и уменьшается пористость. В общем случае капиллярное давление обратно пропорционально среднему размеру частиц порошка, поэтому характеристика дисперсности в значительной степени определяет его спекаемость.

А.С. Бережной предложил характеризовать спекание обобщенным коэффициентом  $Z$ :

$$Z = \frac{C_1(\Pi_1 - \Pi_2)}{\Pi_1} + \frac{C_2(R_2 - R_1)}{R_1}, \quad (5.9)$$

где  $(\Pi_1 - \Pi_2)/\Pi_1$  – относительное изменение пористости;  $(R_2 - R_1)/R_1$  – относительное повышение прочности;  $C_1, C_2$  – коэффициенты.

Закономерности твердофазового спекания базируются на теории Я.И. Френкеля - Б.Я. Пинеса. В соответствии с этой теорией спекание рассматривается как диффузионный процесс заполнения веществом пор материала. Механизм переноса вещества при спекании может быть различным: объемная диффузия, пластическое течение, поверхностная диффузия и испарение-конденсация, однако только в результате объемной диффузии и пластического течения происходит усадка. Процесс спекания можно активизировать за счет реакций, увеличивающих подвижность атомов (диссоциация, полиморфизм оксидов и т.д.), а также внешнего давления (горячее прессование).

Спекание с участием жидкой фазы или жидкостное спекание является самым распространенным в технологии керамики, оно свойственно всей глиносодержащей керамике. Различают 2 случая жидкостного спекания: 1 – взаимодействие твердой и жидкой фаз отсутствует; 2 – такое взаимодействие происходит. Чаще всего взаимодействие может быть незначительным и не влиять на механизм спекания.

Спекание многофазной керамики сопровождается заполнением пор между зернами кристаллической фазы расплавом и склеиванием кристаллических частиц. Для ряда керамических материалов, например, фарфора, характерно смешанное спекание с участием процессов в твердой фазе и в присутствии расплава.

Наряду с твердофазовым спеканием и спеканием с участием жидкой фазы возможны и особые виды спекания – за счет испарения и конденсации, пластической деформации, реакционное спекание. Перенос вещества за счет испарения его с одних кристалликов и конденсации на поверхности других возможен при спекании некоторых кристаллических тонкодисперсных порошков, например, при получении карбида кремния. Спекание за счет пластической деформации может происходить при воздействии на некоторые поликристаллические материалы горячего прессования. Таким способом получают некоторые виды оксидной керамики. При реакционном спекании уплотнение материала происходит за счет образования нового кристаллического вещества. Реакция идет между твердым веществом одного компонента и парообразной фазой другого. На способе реакционного спекания основаны некоторые технологии получения высокоогнеупорной карбидной и нитридной керамики.

## 5.2. Основные технологические процессы

Свойства материалов и изделий, технико-экономическая эффективность их производства определяются в значительной мере особенностями использованной технологии, которая представляет совокупность разных процессов, направленных на получение из исходного сырья готовой продукции.

Общая схема технологии производства строительных материалов включает добывание и транспортирование сырья на предприятие, подготовку рабочей смеси и ее обработку, формование изделий, их обработку для получения требуемых качественных показателей.

В зависимости от вида материалов определенные стадии технологического процесса могут исключаться (например, добывание сырья, если оно привозное, изготовление рабочей смеси – в случае получения изделий из естественного камня, однокомпонентного сырья и т.п.).

Технологические процессы можно классифицировать на:

- механические – измельчение, помол, просеивание, фракционирование, смешивание, формование, уплотнение и т.п.;
- химические – антисептирование, антипирирование, экстрагирование, гидрофобизация, окисление и т.п.;
- тепловые – сушка, обжиг, выпаривание, пропаривание, автоклавирование и т.п..

Различают также гидромеханические (транспортирование газообразных, жидких, порошкообразных материалов, осаждение взвешенных частичек и т.п.); массообменные (разделение сырьевых материалов по их плотности, снижение влажности) и прочие процессы. Во многих случаях технологические процессы являются комплексными. Например, тепловые процессы часто сопровождаются массообменными и химическими реакциями.

**Измельчение и классификация. Пылеулавливание.** Наиболее распространенный и энергоемкий способ обработки сырья для изготовления строительных материалов – *измельчение*. Например, около 70-75% от общего потребления электроэнергии при производстве 1 т цемента расходуется на измельчение сырьевых материалов и клинкера (табл. 5.1).

Измельчать твердые материалы можно для ускорения их химического взаимодействия, получения более однородных смесей и облегчения их последующей обработки.

Под степенью измельчения  $C_{из}$  понимают отношение средних значений диаметров кусков исходного и конечного продуктов. В зависимости от значения  $C_{из}$  различают крупное ( $C_{из}=2-6$ ), среднее ( $C_{из}=6-10$ ), мелкое дробление ( $C_{из}=10-50$ ) и помол ( $C_{из}=50$  и больше). В зависимости от физико-механических свойств материала, начальной крупности зерен и нужной степени измельчения используют способы раздавливания, удара, истирания, раскалывания и их комбинации (рис. 5.5, 5.6).

Хрупкие материалы целесообразно измельчать раздавливанием, а вязкие – раздавливанием с истиранием. Крупное измельчение мягких и хрупких материалов выполняют раскалыванием, а среднее и мелкое – ударом. При тонком измельчении – помоле наиболее часто используют раздавливание и стирание. Древесину и прочие волокнистые материалы измельчают ударом и резанием.



Таблица 5.1

Затраты электроэнергии при изготовлении портландцемента

| Операция                            | Затраты электро-<br>энергии,<br>кВт·час/т | Затраты элек-<br>троэнергии, % |
|-------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|
| Добывание сырья                     | 4                                         | 3,5                            |
| Измельчение сырья                   | 12                                        | 10,5                           |
| Помол сырья                         | 18                                        | 15,5                           |
| Измельчение твердого топлива        | 14                                        | 12,0                           |
| Обжиг клинкера                      | 9                                         | 7,5                            |
| Помол клинкера                      | 38                                        | 34,0                           |
| Сушка добавок                       | 6                                         | 5,0                            |
| Затраты во вспомогательных<br>цехах | 8                                         | 7,0                            |
| Прочие затраты                      | 6                                         | 5,0                            |
| Всего                               | 115                                       | 100                            |

Основными видами машин для измельчения являются щековые (или челюстные), конусные, молотковые (или ударные), валковые дробилки и бегуны. Для помола материалов применяют барабанные, молотковые, вибрационные, струйные и прочие виды мельниц.

Сопротивление материалов измельчению может оцениваться коэффициентом размалываемости. Если принять размалываемость, например, цементного клинкера за единицу, то размалываемость других материалов может быть охарактеризована следующими коэффициентами: известняк – 1,2-1,8; гранулированный доменный шлак – 0,8-1,1; опока – 1,3-1,4; трасс – 0,5-0,6; кварцевый песок – 0,6-0,7.

В соответствии с законом измельчения, установленным Риттингером, работа измельчения ( $A$ ) пропорциональна площади новообразованной поверхности  $\Delta S$ :

$$A = \sigma \Delta S, \quad (5.9)$$

где  $\sigma$  – удельная поверхностная энергия твердого тела.

Работа измельчения по П.А. Ребиндеру:

$$A = \sigma \Delta S + K \Delta V, \quad (5.10)$$

где  $K$  – коэффициент, равный удельной работе деформации (на единицу объема);  $\Delta V$  – часть объема, претерпевающая деформации.

Первый член уравнения (5.10) является энергией, которая расходуется на образование новых поверхностей, а второй – энергией деформации. При высокой степени измельчения вторым членом в уравнении (5.10) можно пренебречь.

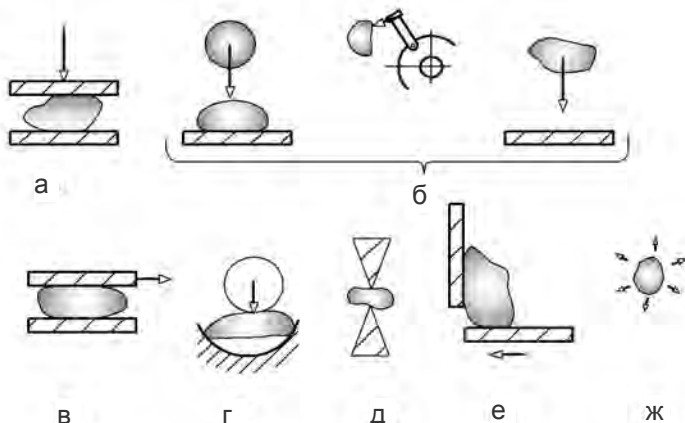


**Рис. 5.5.** Способы измельчения материалов:

а – раздавливанием; б – ударом; в – истиранием; г – изгибом;  
д – раскалыванием; е – резанием; ж – взрывом

В результате анализа деформаций, возникающих при измельчении материалов, был сформулирован закон Кирпичова-Кика, по которому работа измельчения пропорциональна объему или массе измельчаемого куска. Этот закон чаще применяют для анализа крупного и среднего измельчения, а закон Риттингера целесообразно использовать для анализа тонкого измельчения, когда поверхность материала возрастает в сотни раз.

Процессы деформации и разрушения твердых тел существенно изменяются под влиянием физико-химического взаимодействия с внешней средой. Если поверхностная энергия материалов под влиянием ПАВ уменьшается, то их измельчение ускоряется. По опытным данным измельчение в активных средах в 5-7 раз выше, чем помол в воздушной среде при одинаковых затратах энергии. Эти данные согласуются с теоретическими представлениями П.А. Ребиндера, в соответствии с которыми адсорбция ПАВ способна значительно уменьшать предел упругости, прочность и твердость материалов. Клинообразные трещины, развиваемые во время дефор-

мации твердых тел с адсорбционными слоями ПАВ, не смыкаются, что содействует их развитию и в конце концов разрушению материалов.

Во многих технологических процессах измельчение используется в комплексе с *классификацией* зернистых материалов, то есть

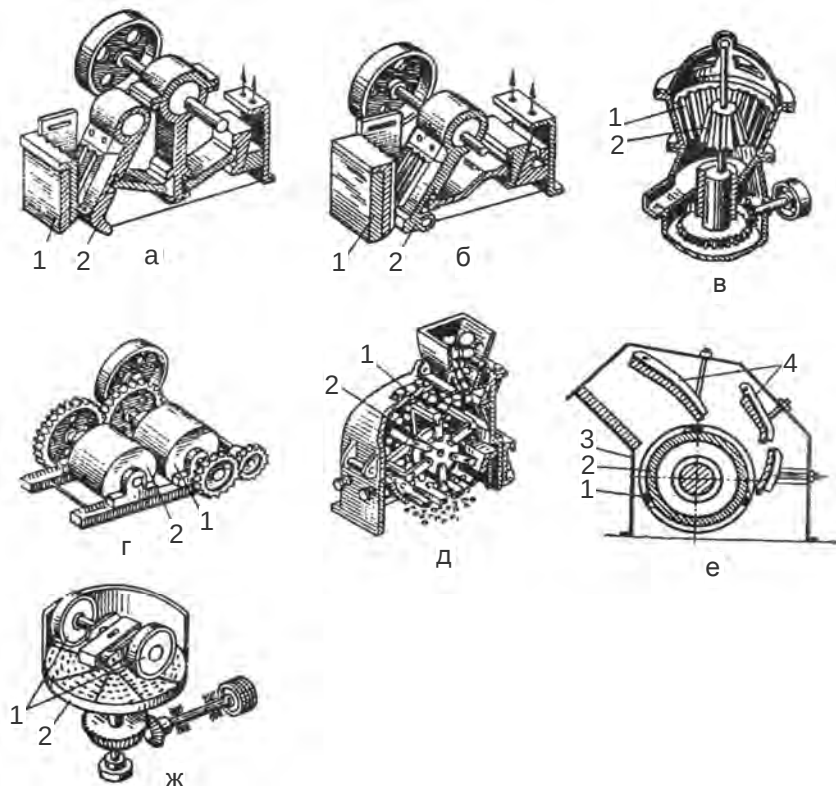


**Рис. 5.6.** Дробилки:

а – щековые с простым качанием щеки; б – щековая со сложным качанием щеки (1 – неподвижная, 2 – подвижная щека); в - конусная (1– неподвижный внешний конус, 2 – подвижный внутренний конус); г – валковая (1,2 – валки, вращающиеся навстречу друг другу); д – молотковая; е – роторная (1 – молотки, 2 – ротор, 3 – корпус, 4 – плиты); ж – бегуны (1 – катки, 2 – чаша)

распределением или сортировкой их по крупности. В зависимости от способа осуществления классификация может быть механиче-

ской (просеивание), воздушной (сепарация), гидравлической и электромагнитной. При *механической классификации* сыпучие материалы разделяют с помощью машин или оборудования (грохотов) с плоскими или барабанными колосниками, решетками или ситами. Простейшие грохоты – подвижные, они могут быть также вращающимися, вибрационными и т.д.

Эффективность грохочения оценивают отношением массы частиц нижнего класса  $M_n$ , то есть частиц, размер которых меньше размера отверстий на сите, к фактическому количеству частиц этого класса в исходном продукте  $M$ , %:

$$K_r = \frac{M_n}{M} \cdot 100. \quad (5.11)$$

Этот показатель, называемый коэффициентом качества грохочения, зависит от параметров процесса, влажности, зернового состава материала и других факторов. Для барабанных грохотов он составляет 50-80%, колеблющихся – 70-80%, вибрационных – 90-95%.

Во время измельчения частички материала можно выделить из воздушной среды под действием силы тяжести из вертикального или горизонтального потока или под влиянием центробежной силы из криволинейного потока. В существующих конструкциях воздушных сепараторов наиболее часто разделение происходит при совместном действии этих сил. Метод *воздушной сепарации* широко используется при работе помольных агрегатов по замкнутому циклу, если нужно отделить от общего потока материала готовый продукт, а более крупные частички направить на домол (рис. 5.7).

*Гидравлическая классификация* осуществляется в водном потоке. Скорость потока выбирают такой, чтобы из классификатора выносились на слив частички размером меньше определенной крупности, а в классификаторе оседали частички больших размеров (нижний продукт). Гидравлическую классификацию широко применяют при обогащении сырьевых смесей, то есть отделении примесей и фракционировании. Отмывание примесей обычно осуществляется в спиральных классификаторах и гидроциклонах, а фракционирование песков – в вертикальных гидравлических классификаторах. Все эти способы и процессы основываются на законах гидродинамики.

При измельчении, просеивании и других видах переработки материалов имеет место выделение пыли в атмосферу. Это приводит к ухудшению санитарно-гигиенического состояния как заводских, так

и близлежащих территорий, работы механизмов, а также служит причиной материальных затрат и снижения технико-экономических показателей производства.

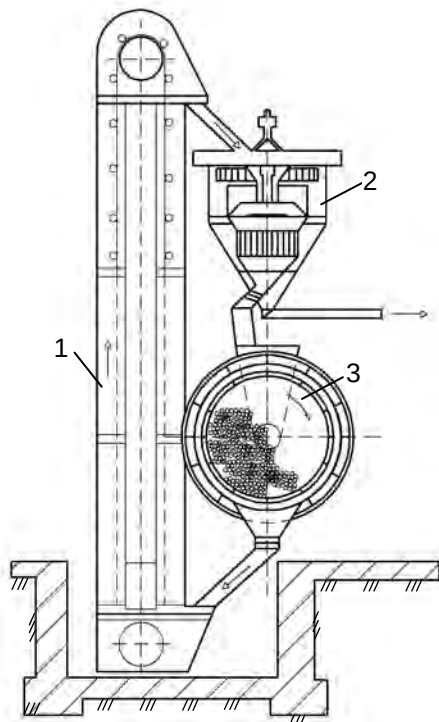


**Рис. 5.7.** Схема работы помольного агрегата с центробежным сепаратором в замкнутом цикле: 1 – элеватор; 2 – центробежный сепаратор; 3 – шаровая мельница

Технические методы очистки от пыли можно разделить на такие основные группы:

- *Механическая (сухая) очистка газов*, при которой частички оседают под действием механических сил – тяжести, центробежных и инерционных. Для механической очистки применяют пылеосадительные камеры, циклоны (рис. 5.8), центробежные пылеуловители ротационного действия и инерционные пылеуловители.

- *Электрическая очистка газов*, при которой частички оседают в электрическом поле высокого напряжения. Электрическую очистку осуществляют с помощью пластинчатых и трубных электрофильтров (рис. 5.9).

- *Фильтрация газов* – через тканые (рукавные) фильтры, насыпные или набивные и керамические фильтры, которые задерживают частички, взвешенные в газовом потоке.

- *Мокрая очистка* – орошение газового потока жидкостью или промывание его при прохождении через слой жидкости. К гидравлическим пылеуловителям относятся скрубберы и гидроциклоны.

• Оседание частичек с использованием для их агрегации *ультразвука*.

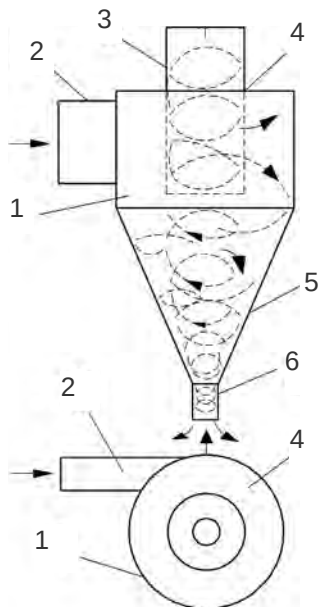


**Рис. 5.8.** Схема действия циклона:  
1 – цилиндрическая часть; 2 – газоход; 3 – патрубок для выхода газа; 4 – крышка; 5 – коническая часть; 6 – патрубок для выгрузки

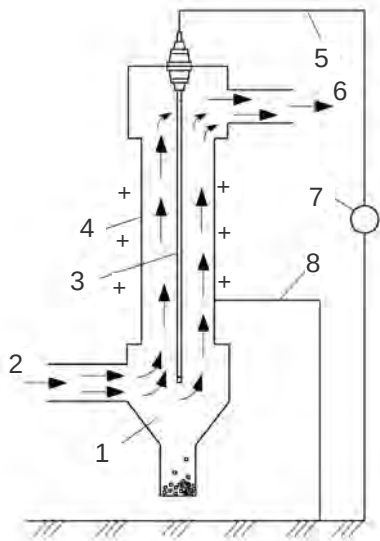


**Рис. 5.9.** Схема работы электрофильтра:  
1 – бункер; 2 – входение неочищенного газа; 3 – провод; 4 – цилиндр; 5 – провод с отрицательным зарядом; 6 – выход очищенного газа; 7 – источник тока высокого напряжения; 8 – заземление

Эффективность работы пылеосадительного устройства оценивается КПД или *степенью очистки*:

$$K_{\phi} = (M_2/M_1) \cdot 100\% = [(C_1 - C_2)/C_1] \cdot 100\%, \quad (5.12)$$

где  $M_1$  – количество пыли, которая поступает в пылеуловитель;  $M_2$  – количество уловленной пыли в пылеуловителе;  $C_1$ ,  $C_2$  – концентрация пыли до и после оседания, г/м<sup>3</sup>.

Степень очистки, достигаемая пылеуловителями, зависит от многих факторов, но главными из них являются размер частичек

пыли, поступающих в камеру оседания, тип или конструкция пылеуловителя. Границы применения разнообразных видов пылеосадительных устройств в зависимости от размера частичек и достигаемая степень очистки приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Степень очистки газов разными пылеуловителями

| Агрегат                             | Размер частичек, которые оседают, мкм | Степень очистки, % |
|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Пылеосадительная камера             | 5...2000                              | 40...70            |
| Центробежный пылеуловитель (циклон) | 3...100                               | 45...85            |
| Электрофильтр                       | 0,005...10                            | 85...90            |
| Гидравлический пылеуловитель        | 0,01...10                             | 85...95            |

**Дозирование и смешивание. Формование.** Из подготовленных компонентов составляются сырьевые смеси или шихты. При получении смеси основными процессами являются дозирование и смешивание. Наиболее точным является *дозирование* по массе. Вода и прочие жидкости могут дозироваться как по массе, так и по объему с одинаковой точностью. Значительные погрешности объемного дозирования возникают во время работы с сыпучими материалами из-за больших колебаний их насыпной плотности и в особенности влажности.

Аппараты для дозирования – дозаторы – в установках для изготовления строительных материалов могут быть непрерывными и циклическими, с автоматическим и ручным управлением.

Основная цель *смешивания* – обеспечение равномерного распределения компонентов смеси и достижение нужной однородности. С однородностью смесей тесно связаны их свойства, а также качество материалов и изделий на их основе. Распространены два основных способа смешивания: механический – с помощью машин-смесителей и пневматический – с помощью сжатого воздуха (барботажа). Смешивание может осуществляться как периодически, так и непрерывно. Однородность смеси зависит от количества перемещений частичек и их траектории. Так, лучше всего бетонные смеси смешиваются в центре бетоносмесителя. Важную роль играет тра-

ектория при наличии крупных зерен, поскольку при этом смесь может расслаиваться под действием силы тяжести.

Для преодоления инерции наивыгоднейшим считается вращательное движение. Порошковые материалы смешивают с помощью барабанных, шнековых, ленточных, циркуляционных, центробежных, вибро- и пневмосмесителей. Барабанные смесители являются простейшими, однако смешивание в них происходит сравнительно медленно. Аппаратами интенсивного смешивания являются одно- и двухвальные шнековые смесители. К эффективным видам смесителей принадлежат циркуляционные, центробежные и вибросмесители. В одних материалы смешиваются интенсивной циркуляцией их в распыленном (псевдоразжиженном) состоянии, в других – за счет центробежной силы, развиваемой при вращении ротора, в третьих – за счет создания подвижного слоя на поверхности, которая колеблется с высокой частотой.

При изготовлении растворов и бетонных смесей, эмульсий, паст смешивание происходит в жидких средах с помощью лопастных, пропеллерных, турбинных и других механических смесителей (рис. 5.10), сопл, насосов, а также при барботаже.

Интенсивность смешивания зависит от реологических характеристик материалов, начальной степени неоднородности и количественного соотношения смешиваемых компонентов.

Из хорошо перемешанной однородной смеси заданного состава формуруются строительные изделия, которые имеют определенные геометрическую форму и размеры, а также требуемые свойства. Наиболее характерным для технологии строительных материалов является применение таких способов *формования* как прессование, пластическое формование, вибрирование, литье, экструзия (рис. 5.11). Применяются также другие способы формования: трамбование, центрифугирование, прокат, торкретирование и т.п.

Формование *прессованием* применяют большей частью при использовании малопластичных, сыпучих сырьевых смесей. Во время прессования принудительно перемещаются и взаимно сближаются твердые компоненты смеси, что приводит к наиболее компактному размещению их в определенном объеме, выдавливанию свободной воды и воздуха.



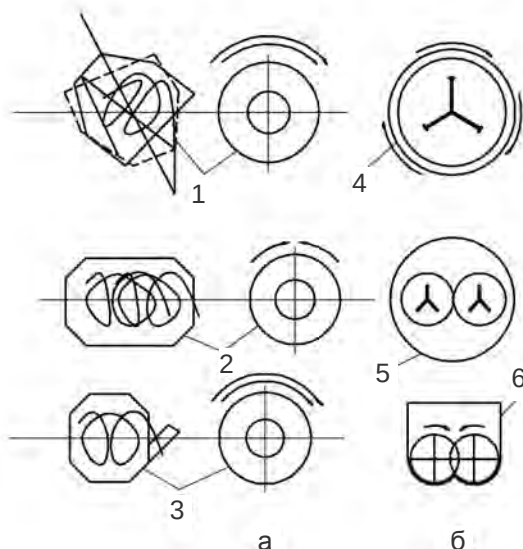


**Рис. 5.10.** Схемы бетоносмесителей:

а – гравитационного действия; б – принудительного действия:

- 1 – перекидной; 2 – неперекидной реверсивный;
- 3 – нереверсивный с выгружающим лотком; 4 – противоточного действия с вращающейся чашей; 5 – с двумя смесительными устройствами; 6 – двухвальный

Прессование может быть одно- и двусторонним, непрерывным (одноступенчатым) и прерывистым (многоступенчатым). В процессе прессования различают три стадии:

- сравнительно легкое сближение частичек под действием нагрузки;
- скачкообразное изменение оседания массы вследствие упругой деформации частичек;
- достижение критического давления с прекращением уплотнения массы и достижением максимальной контактной площади поверхности между частичками.

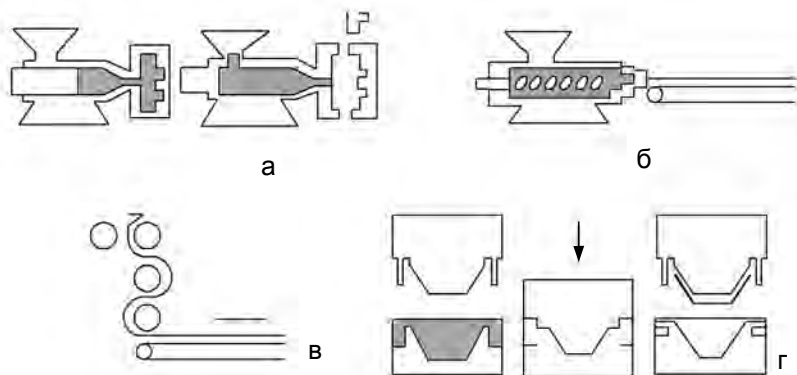


**Рис. 5.11.** Схема формования изделий из пластических масс: а – литье под давлением (инжекция); б – непрерывное профильное выдавливание (экструзия); в – вальцование; г – прессование

Оптимальное давление прессования подбирают опытным путем. При этом учитывают давление, нужное для доведения массы до заданной плотности и преодоление трения массы о стенки прессформ, а также некоторое избыточное давление из-за различия влажности, зернового состава и т.п.

При полусухом прессовании порошковых масс под давлением более 10 МПа зависимость между пористостью сырца  $\Pi$  и давлением прессования  $P$  описывается формулой А.С. Бережного:

$$\Pi = a - b \lg P, \quad (5.13)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические константы.

Значения  $a$  и  $b$  зависят от состава и реологических свойств масс. Например, для огнеупорных масс предлагается принимать  $a=50$ ,  $b=15$ . Давление, при котором объем массы равняется сумме объемов твердых и жидких частиц, называется критическим. Если давление превышает критическое, наступает перепрессование, развивается упругое противодействие, которое приводит к разрушению образовавшихся контактов и возникновению трещин.

Оптимальное давление прессования наиболее часто составляет 5-15 МПа, оно зависит от влажности и зернового состава смеси. С повышением влажности уменьшается внутреннее трение частиц, однако это мешает выходу воздуха и получению плотной структуры. Обычно влажность массы порошков для полусухого прессования составляет 6-12%. Лучшие условия прессования обеспечивают

ся при непрерывной гранулометрии и максимальном размере зерен до 3 мм.

Формование прессованием можно выполнять *штампованием* с передачей прессующей нагрузки через штамп, который перекрывает всю площадь изделия и формирует лицевую и тыльную поверхности; *прессованием с помощью катков*, перемещаемых по уложенной в форму смеси (рис. 5.12); *вибропрессованием*, объединяющим в себе статическое давление и вибрирование.

Разновидностью прессования является *трамбование*, суть которого состоит в многократном приложении к частицам уплотняемого материала мгновенного прессующего давления.

Изделия из пластических (например, глинистых) масс изготавливаются *пластическим формованием* на ленточных прессах (рис. 5.12).

Пластическое формование позволяет придать изделиям сложную форму при сравнительно низком давлении прессования. Непременным условием пластического формования изделий является использование довольно вязких масс, для которых сумма сил внутреннего сцепления (когезия) больше сил сцепления с рабочей поверхностью формовочного органа (адгезия), а коэффициент внутреннего трения больше чем внешнего. Сырцовые изделия, сформованные таким способом, имеют более низкую прочность, чем прессованные, для них характерны такие дефекты структуры, как свилеватость и S-образные трещины. Пластическое формование наиболее часто используется для получения керамических и других изделий. В ленточных прессах с помощью шнекового механизма масса транспортируется, уплотняется и продавливается сквозь мундштук, предназначенный для придания изделиям точных размеров, формы и дополнительного уплотнения бруса.

Близким к пластическому является формование *экструзией* (рис. 5.11, б) – получение материалов и изделий из полимерных и некоторых других сырьевых смесей продавливанием сквозь мундштук. Так формируют разнообразные пластмассовые профили, трубы, листы, пленки и т.п. Для выдавливания пластических масс применяют преимущественно шнековые экструзионные машины.

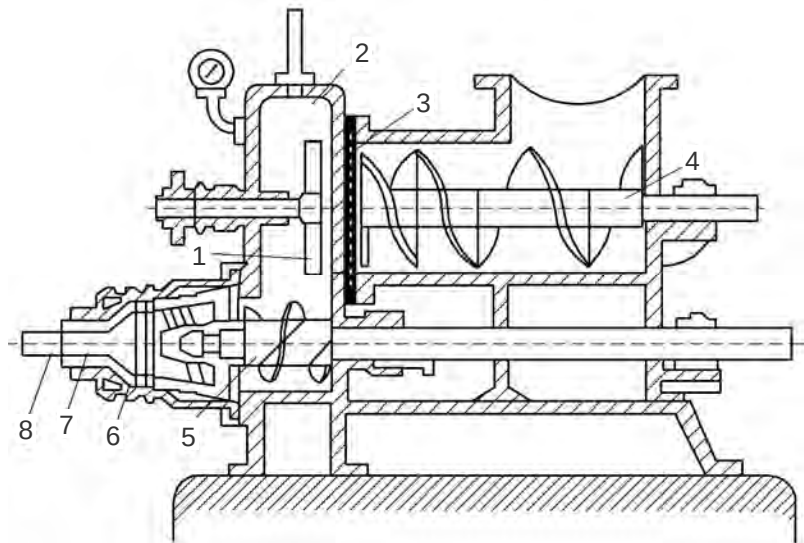


**Рис. 5.12.** Ленточный вакуум-пресс:

1 — нож; 2 — камера; 3 — решетка; 4 — глиняная; 5 — шнековый вал; 6 — прессующая головка; 7 — мундштук; 8 — глиняный брус

Формование *литьем* состоит в заполнении соответствующего объема сырьевой смесью и ее уплотнении под действием сил тяжести. Этот способ применяют для сырьевых смесей, которые имеют достаточную текучесть, зависящую от свойств твердой фазы, водотвердого отношения, наличия добавок электролитов и ПАВ. Наряду с нужной текучестью (подвижностью) смеси для литья должны иметь достаточную структурную прочность и вязкость для противодействия расслоению вследствие седиментации (оседания) частиц твердой фазы. Литье применяют для изготовления гипсовых изделий, а также для получения ячеистых бетонов, керамических санитарно – строительных изделий из шликеров.

Метод шликерного производства основан на способности глин давать стойкие водные суспензии, а также на поглощении жидкой фазы капиллярами гипсовой формы с образованием на ее поверхности твердого слоя. Скорость набора стенки изделия зависит от скорости поглощения формой жидкой фазы шликера, гранулометрического состава твердой фазы и соотношения твердой и жидкой фаз. При значительном опережении скорости поглощения воды формой

на поверхности отливки получается чрезмерно уплотненный слой, что приводит к отслаиванию и появлению трещин. При отстаивании скорости поглощения воды формой может происходить ее размывание и прилипание изделий.

В последнее время область применения способа формования изделий с помощью литья расширяется. Его применяют, например, для изготовления бетонных и железобетонных изделий из литых бетонных смесей, разжиженных суперпластификаторами, которые вводятся в бетонную смесь на стадии перемешивания.

К наиболее распространенным способам формования принадлежат методы *вибрирования*. Свыше 90% всех изделий из бетона и железобетона изготавливается с использованием вибрации. Это объясняется тем, что в процессе вибрационного воздействия на бетонные смеси создаются условия для тиксотропного разжижения и наиболее компактного размещения частичек. Вибрирование – это колебательный процесс, который характеризуется величинами амплитуды, частоты и интенсивности колебаний. Во время формования бетонных смесей эффективными являются синусоидальные и периодические несинусоидальные (поличастотные) колебания. Могут также объединяться разные виды вибрирования.

Достаточно надежным показателем вибрационного воздействия является *интенсивность вибрации*, которая может быть определена для синусоидальных колебаний по формуле,  $\text{см}^2/\text{с}^3$ :

$$I = A^2 f^3, \quad (5.14)$$

где  $A$  – амплитуда колебаний;  $f$  – частота.

Показатель интенсивности вибрирования для большинства смесей, которые применяются для формования железобетонных конструкций, составляет  $80\text{--}300 \text{ см}^2/\text{с}^3$ . На рис. 5.13 заштрихованная площадь соответствует наиболее распространенным на практике амплитудам вибраций.

Амплитуда колебаний зависит от размеров частичек заполнителя бетонной смеси. Для крупнозернистых тяжелых бетонов она равна  $0,3\text{--}0,7\text{ мм}$ , с повышением жесткости смесей ее увеличивают, при этом целесообразно увеличивать и частоту вибрации. Слишком большие амплитуды колебаний без использования нагрузки могут вызвать разрыхление бетонной смеси и ухудшить свойства бетона.

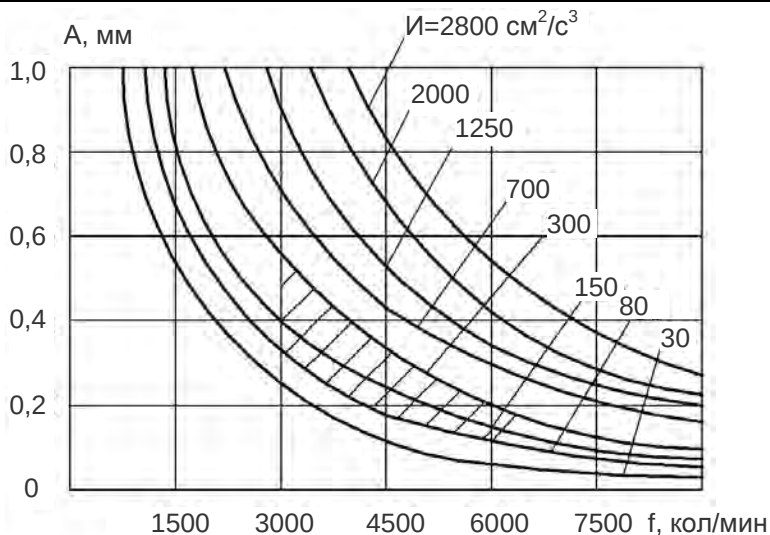


**Рис. 5.13.** Зависимость между амплитудами и частотами колебаний разной интенсивности вибрации

С уменьшением крупности заполнителя соответственно возрастает частота колебаний. Например, при крупности заполнителя 40 мм оптимальная частота составляет 38 Гц; 20 мм – 50 Гц; 10 мм – 100 Гц.

Использование разночастотных режимов вибрации дает возможность улучшить уплотнение разных фракций заполнителя.

Для каждой бетонной смеси при принятых параметрах колебаний оптимальной является продолжительность вибрирования, которую подбирают опытным путем. Сократить время вибрирования можно за счет повышения (до определенного предела) интенсивности вибрирования и создания давления на поверхности уплотняемой смеси с помощью пригруза.

Виброуплотняют смеси разными машинами, среди которых распространены глубинные и поверхностные вибраторы, а также виброплощадки. При всем разнообразии конструкций виброуплотняющих машин они имеют инерционные вибровозбудители дебалансного или самобалансного типа. Для предприятий железобетонных изделий характерным оборудованием являются виброплощадки (рис. 5.14). На них формируются свыше 80% всех железобетонных

изделий. Большинство промышленных виброустановок имеет частоту вибрации 3000 кол/мин (амплитуда 0,25-0,70 мм). Для объемных изделий значительной толщины целесообразно применять режим низкой частоты (10-15 Гц) и большой амплитуды колебаний (3-10 мм).

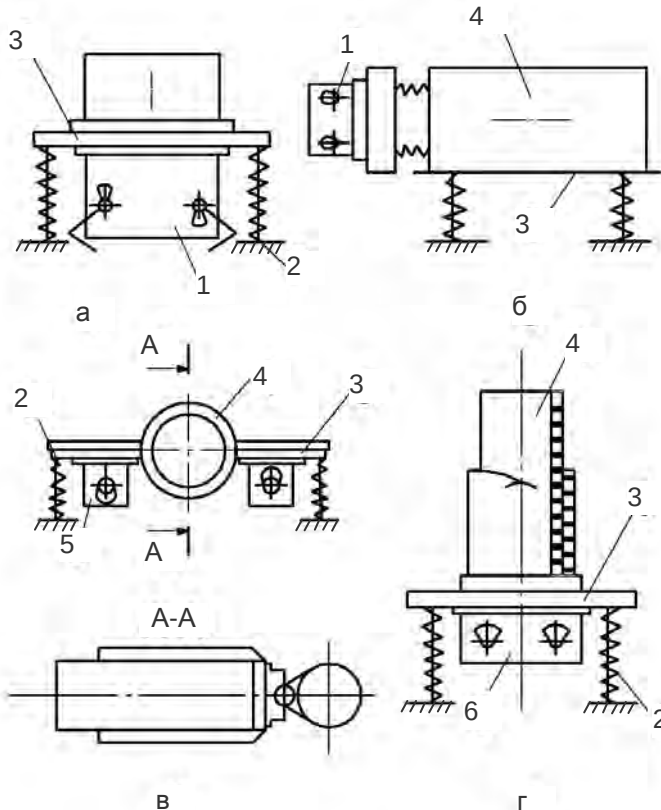


**Рис. 5.14.** Схемы виброплощадок:

а – с прямолинейными вертикальными колебаниями; б – с прямолинейными горизонтальными колебаниями; в – с угловыми колебаниями; г – с комбинированными колебаниями; 1 – вибратор направленных колебаний; 2 – пружина; 3 – рама виброплощадки; 4 – форма с изделием; 5 – вибратор угловых колебаний; 6 – вибратор комбинированных колебаний

Вибрационные машины разделяют на три группы: безударные, ударно-вибрационные и резонансные. К *безударным* принадлежит большинство применяемых вибрационных машин и устройств – виброплощадки, вибраторы, вибровставки, виброштиты, виброштампы и т.п. В *ударно-вибрационных* машинах колебания рабочего органа сопровождается ударами о другие элементы машины или о среду, которая обрабатывается. Примером такой машины является ударная виброплощадка, платформа которой вместе с формой непрерывно поднимается и падает, ударяясь о металлические балки. В *резонансных* вибрационных машинах частота принудительных колебаний близка к собственной частоте колебательной системы.

Вибрирование часто применяют вместе с другими способами уплотнения (виброштампование, вибропрессование, вибровакuumирование, вибропрокат).

Формование *центрифугированием* применяют при изготовлении конструкций трубчатого сечения (трубы, стояки, опоры и т.п.). Суть процесса состоит в том, что смесь, которая помещается во вращаемой форме, под действием центробежных сил, откидывается к стенкам формы, распределяется на них равномерным слоем и уплотняется. Центрифуги отличаются одна от другой конструкцией привода формы (роликовые, осевые, ременные и др.).

**Тепловая обработка.** Сформованные изделия обычно поступают на тепловую обработку, в результате которой они приобретают необходимые физико-механические свойства.

Основными разновидностями тепловой обработки являются сушка, обжиг, плавление, тепловлажностная обработка.

*Сушкой* называют процесс испарения влаги из материала с последующим удалением образованного пара в окружающую среду. В производстве строительных материалов и изделий сушке подвергают сырьевые материалы, полуфабрикаты и готовые изделия. Например, в керамической промышленности сушку проводят для получения глинистых и других компонентов, а также сформованных изделий с влажностью, необходимой для нормального протекания процесса обжига.

Сушка возможна тогда, когда давление водяных паров на поверхности высушиваемого материала больше, чем в окружающей среде. Давление водяных паров в материале возрастает с увеличе-



нием влажности и температуры сушки и уменьшается с усилением связи влаги с материалом.

По П.А Ребиндеру существуют три формы связи влаги с материалом: физико-механическая, физико-химическая и химическая. Физико-механическая вода содержится в капиллярах за счет капиллярного давления и поверхностного натяжения. В микрокапиллярах водяной пар поглощается за счет эффекта капиллярной конденсации, поскольку давление над вогнутым мениском меньше, чем парциальное давление окружающей среды. Вода в макропоры поглощается при непосредственном соприкосновении с материалом и является свободной.

Физико-химическая вода в материалах может быть адсорбционной, осмотической и структурной. Адсорбционная вода образует связи при избыточном энергетическом уровне поверхности твердой фазы, что характерно для материалов с развитой поверхностью раздела фаз. При осмотической форме связи влаги она удерживается за счет осмотического давления, которое возникает в основном в органических материалах клеточного происхождения. Замкнутая клетка является осмотической ячейкой, и диффузия жидкости обусловлена разностью осмотических давлений растворенной фракции внутри клетки и извне. Структурная влага содержится в закрытых порах. Она характерна, например, для тонкодисперсных бентонитовых глин.

Химически связанная вода соединяется с материалом в точных стехиометрических соотношениях и образует новые вещества. Примерами таких образований являются минералы: каолинит  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , монтмориллонит  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , гипсовый камень  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и т.п.

Свободная физико-механическая вода может быть удалена механическим способом (давлением, вакуумированием, фильтрацией, центрифугированием).

За счет сушки удается удалить физико-механическую и физико-химическую влагу. Химически связанная вода удаляется только высокотемпературной обработкой или за счет действия химических реагентов.

Сушить материалы можно в обычных условиях, то есть на открытом воздухе без дополнительного нагревания и при нагревании в специальных сушилках. Теплота к материалу может подводиться:

конвективно-омывающим теплоносителем (горячим воздухом или дымовыми газами), за счет теплопроводности, излучением - облучением материала инфракрасными лучами, при действии токов высокой частоты. В некоторых случаях возможна сублимационная сушка испарением влаги без перехода в жидкое состояние при низких температурах и глубоком вакууме.

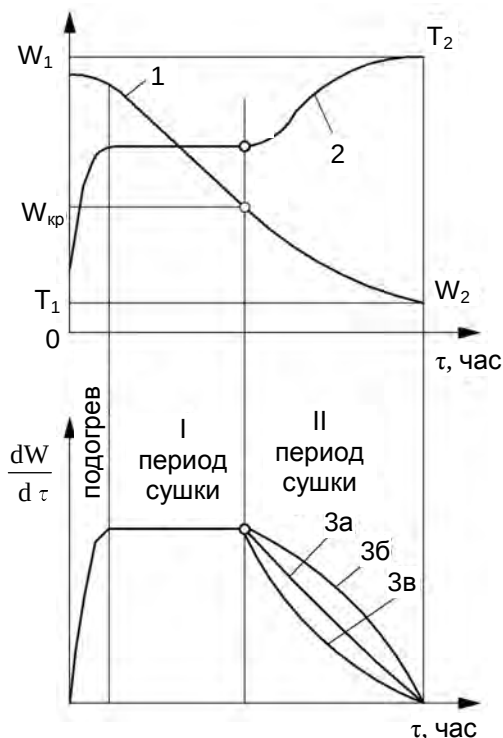


**Рис. 5.15.** Типичные кривые сушки: 1 – влажность; 2 – температура; 3 – скорость сушки материала;  $dW/dt$  – скорость сушки

лостью к оси ординат (рис. 5.15, 3б), для пористых керамических материалов – выпуклостью к оси абсцисс (рис. 5.15, 3в). Более сложные по структуре влажные материалы характеризуются во втором периоде и более сложными кривыми сушки.

Процесс сушки твердых материалов можно представить кривыми, которые имеют общий характер и условно разделены на три участка: 1 – стадия прогрева; 2 – период постоянной скорости сушки (первый период); 3 – период падающей скорости сушки (второй период) (рис. 5.15).

Материалы, разные по характеру связи влаги, характеризуются разной формой кривой скорости сушки. По А.В. Лыкову волокнистые материалы (бумага, тонкий картон) дают кривые с прямолинейными участками, которые отвечают периоду падающей скорости (рис. 5.15, 3а). Для тканей, тонких кож характерны кривые, повернутые выпук-

Температурные кривые имеют большое значение для технологии сушки, поскольку часто качество высушенного материала зависит от температуры и продолжительности ее действия. Температура материала в процессе сушки значительно ниже температуры окружающего воздуха, поэтому в первом периоде может применяться теплоноситель с более высокой температурой и невысокой влажностью.

Сушка строительных материалов и изделий проводится большей частью за счет конвективного теплообмена между теплоносителем и материалом. При этом поток теплоты от теплоносителя к материалу можно определить по формуле:

$$Q = \alpha(t_t - t_{п.м.}), \quad (5.15)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $t_t$ ,  $t_{п.м.}$  – средняя температура соответственно теплоносителя и поверхности материала.

Коэффициент теплоотдачи зависит от аэродинамических условий обтекания материала теплоносителем, его свойств, поверхности материала, из которой испаряется влага, и ряда других факторов. Условия теплоотдачи изучают с применением теории подобия, используя критериальные зависимости.

Сушильные установки по режиму работы разделяют на сушилки периодического и непрерывного действия, по способу передачи теплоты на конвективные, контактные, радиационные, с использованием токов высокой частоты и т.п., по схеме движения теплоносителя на противоточные, прямоточные, с рециркуляцией и т.п., по конструкции на распылительные для суспензий, с сушкой во взвешенном и кипящем слое, барабанные, шнековые, туннельные и конвейерные.

*Обжигом* в технологии строительных материалов называют высокотемпературную обработку сырья и полуфабрикатов, вследствие которой в них происходят необратимые физико-химические процессы, изменяющие фазовый состав, структуру и свойства материалов. Обжиг – основная технологическая операция получения минеральных вяжущих веществ и керамических материалов. В зависимости от вида материалов во время обжига преобладают такие процессы как дегидратация (гипс, глинистые минералы), диссоциация (карбонаты), синтез силикатов, алюминатов, ферритов (цементный клинкер).

## 5. Физико-химические и технологические процессы

Скорость взаимодействия компонентов сырьевых смесей при обжиге изменяется в зависимости от строения кристаллов, (состояние решетки, тип примесей и дефектов, вид связи и т.п.), степени измельчения зерен и т.п. Высокотемпературный обжиг материалов завершается спеканием и получением продуктов с камнеподобной структурой.

Для обжига материалов и изделий применяют промышленные печи (рис. 5.16), которые классифицируют по технологическому назначению, режиму работы, конструктивной схеме, способу теплообмена и источникам выделения тепла (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Классификация промышленных печей для обжига  
строительных материалов

| Классификационный признак  | Вид печи                                                                                                                                                     |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Технологическое назначение | Для обжига кусковых и сыпучих материалов.<br>Для обжига сформованных изделий Спекание (омоноличивание) сыпучих материалов.<br>Получение силикатных расплавов |
| Режим работы               | Периодически (циклически) действующие Непрерывно действующие                                                                                                 |
| Конструктивная схема       | Шахтные, вращающиеся, камерные, кольцевые, туннельные, ваннные                                                                                               |
| Способ теплообмена         | Прямого огня, муфельные (радиационные)                                                                                                                       |
| Источник тепловыделения    | Пламенные. Электрические                                                                                                                                     |

Наряду с физико-химическими преобразованиями в обжигаемом материале происходят сложные процессы горения и газификации топлива, движения продуктов горения в рабочем пространстве печи, тепло- и массообменные процессы, связанные с эндо- и экзотермическими эффектами. Достижение нужных свойств определяется оптимальностью температурного режима и химического состава атмосферы печи (газового режима). Температура обжига составляет от 180°C для гипса до 1450°C для портландцементного клинкера. Химический состав печной атмосферы определяется избытком кислорода в печных газах: до 1% в восстановительной среде; 1,5-2% – в нейтральной; свыше 2% – в окислительной.

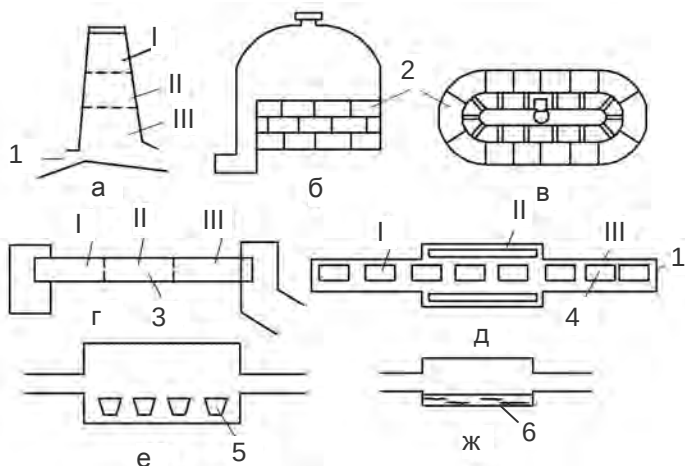


**Рис. 5.16.** Печи с разным устройством рабочей камеры:  
а – шахтная; б, в – камерные; г – вращающаяся; д – туннельная; е – тигельная; ж – ванная; I...III – соответственно зоны подогрева, обжига, охлаждения; 1 – разгрузка; 2 – материал; 3 – барабан; 4 – вагонетка; 5 – тигель; 6 – ванна

Во время обжига сырьевые смеси могут частично плавиться. При получении ряда силикатных материалов и металлов необходимо полное *плавление* смесей. Чистые кристаллические вещества имеют строго определенную температуру плавления, которая соответствует термодинамическому равновесию, когда свободная энергия твердой и жидкой фаз одинакова. Температура плавления минералов изменяется от 0°C (лед) до 3800°C (графит). Сырьевые смеси содержат компоненты с разными температурами плавления. Они плавятся неодновременно, в первую очередь получают расплавы, которые соответствуют эвтектическим температурам реагирующих веществ. Наиболее легкоплавкие соединения - плавни - снижают температуру плавления тугоплавких компонентов смеси соответственно их эквивалентным массам (правило Рихтерса).

Количество теплоты, необходимое для плавления 1 кг вещества, предварительно нагретого до температуры плавления, называется скрытой теплотой плавления. Для тепловых расчетов плавильных

устройств при производстве силикатных материалов скрытую теплоту плавления принимают приблизительно 335 кДж/кг расплава.

В промышленных условиях плавление осуществляют в восстановительной, окислительной и нейтральной средах, а также в вакууме.

Плавлением в восстановительной среде получают чугун, а также большинство ферросплавов; в окислительной – сталь в мартеновских и электродуговых печах; в нейтральной – специальные сплавы (например, в среде аргона), стекло. Плавлением в вакууме получают особо чистые материалы.

Расплавы получают в *плавильных печах*. Для производства металлов и сплавов применяют доменные, мартеновские, электрические печи; для минеральной ваты – вагранки, ваннные и электродуговые печи; для фриттованных глазурей – вращающиеся печи периодического действия и ваннные печи; для стекла – горшковые и ваннные печи.

Тепловую обработку, при которой в нагретом материале сохраняется влага, называют *тепловлажностной*. Такая обработка – основной метод ускорения твердения бетонных и железобетонных изделий, силикатных и других изделий на основе минеральных вяжущих гидратационного твердения. Как теплоносители при тепловлажностной обработке применяют пар, электроэнергию, продукты сгорания естественного газа, горячий воздух, органические и неорганические масла.

Наиболее распространенным теплоносителем является пар. Объединение в нем теплоты и влаги, нужных для твердения гидравлических вяжущих, сделало *пропаривание* распространенным способом тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий.

Теплоноситель, контактирующий с поверхностью материала, обменивается с ним теплотой и массой. Этот процесс называется внешним тепло- и массообменом. Тепло- и массообмен между поверхностями и внутренними слоями материала называют внутренним.

Режим пропаривания характеризуется тремя периодами: повышением температуры, изотермическим выдерживанием и охлаждением изделий.

Повышение температуры в материале вызывает температурные и влажностные градиенты. Температурные напряжения от расширения компонентов смеси и внешних слоев изделия вместе с влажностными напряжениями от набухания приводят к развитию в структуре материала сложнапряженного состояния. В особенности отрицательно сказывается расширение пузырьков воздуха, который содержится в сырьевой смеси. Чтобы устранить деструктивные явления, изделия перед пропариванием должны иметь необходимую критическую прочность (0,6-0,8 МПа), при которой они могут выдержать возникающие напряжения.

Второй период пропаривания – изотермический, характеризуется интенсивным набором материалом прочности. Охлаждение изделий характеризуется потерей влаги вследствие повышения температуры и увеличения давления паров в материале по отношению к внешней среде. Если изделия охлаждаются чрезмерно быстро, то в них могут появиться трещины вследствие развития напряжений растягивания, превышающих прочность материала.

Для пропаривания материала применяют тепловые установки периодического действия (ямные пропарочные камеры – рис. 5.17, кассеты, колпаки, термоформы) и непрерывного действия (вертикальные, туннельные и щелевые камеры (рис. 5.18)). При пропаривании тепловлажностная обработка материалов происходит в условиях насыщенной или близкой к ней паровоздушной смеси при температуре до 100°C и относительной влажности, которая равняется приблизительно 100%.

Для изделий (например, из легких бетонов) с повышенным начальным водосодержанием эффективны способы тепловлажностной обработки, которые дают возможность удалить часть воды из бетонов. С этой целью применяют тепловые установки для *воздушно-сухого прогрева*, источником энергии в которых является электричество, пар или газ.

Ускорить твердение бетонов электропрогревом можно тремя способами: электропрогревом изделий в формах; предварительным электропрогревом бетонной смеси (горячее формование) с последующим термосным выдерживанием; обогревом изделий электронагревательными элементами. При *электронагреве* твердение бетонов ускоряется благодаря теплоте, которая выделяется во время прохождения электрического тока. Именно на этом основан элек-

троразогрев материала при “горячем формовании” изделий. Эти способы тепловой обработки не требуют специальных камер. Во время *электропрогрева* теплота, нужная для ускорения твердения бетона, поступает от вмонтированных в камере электрических нагревателей – электроламп, спиралей, трубных нагревателей и т.п., которые являются источниками инфракрасных лучей. При этом изделия подвергаются радиационному конвективному нагреванию в сухой воздушной смеси. Электронагреватели можно заменить газовыми инфракрасными излучателями, которые работают на естественном или сжиженном газе. Тепловая обработка продуктами сгорания естественного газа проводится в камерах, куда поступает газозвдушная смесь заданной температуры.

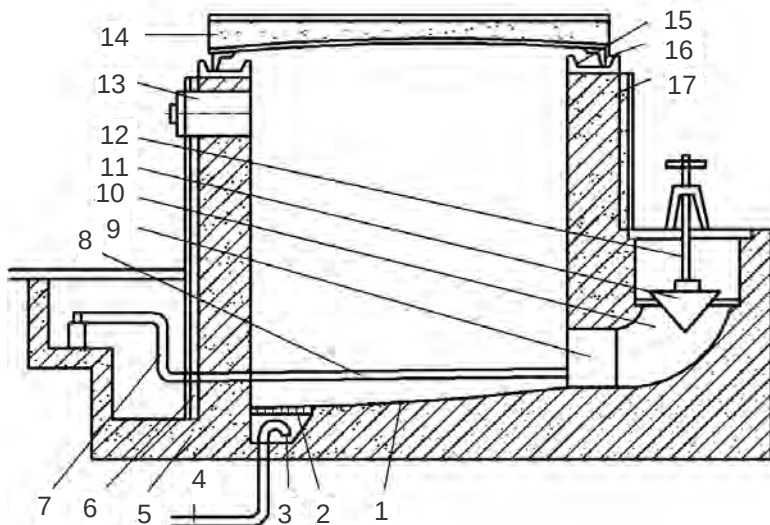


**Рис. 5.17.** Пропарочная камера ямного типа:

1 – пол камеры; 2 – трап для отвода конденсата; 3 – конденсатоотводящие устройства; 4 – система конденсатоотвода; 5 – стены камеры; 6 – отверстие для ввода пара; 7 – трубопровод; 8 – перфорированная труба; 9 – отверстие для вентиляции камеры при охлаждении; 10 – канал для отбора паровоздушной смеси; 11 – герметизирующий конус; 12 – червячный винт; 13 – затвор для поступления воздуха; 14 – крышка; 15 – швеллер; 16 – уголок; 17 – теплоизоляция



Для нагревания материалов практически без градиентов температур и влажности предназначены токи высокой частоты (ТВЧ). В отличие от других этот способ тепловой обработки дает возможность передавать внутрь материала значительное количество теплоты и обеспечить равномерное нагревание материалов по всему объему. Для нагревания ТВЧ материал помещают в обкладки конденсатора, к которому подводят ТВЧ от генератора.

Рассмотренные выше способы тепловлажностной обработки осуществляют при атмосферном давлении. При значительном избыточном давлении водяного пара (0,9-1,3 МПа) тепловлажностную обработку проводят в автоклавах (рис. 5.19).

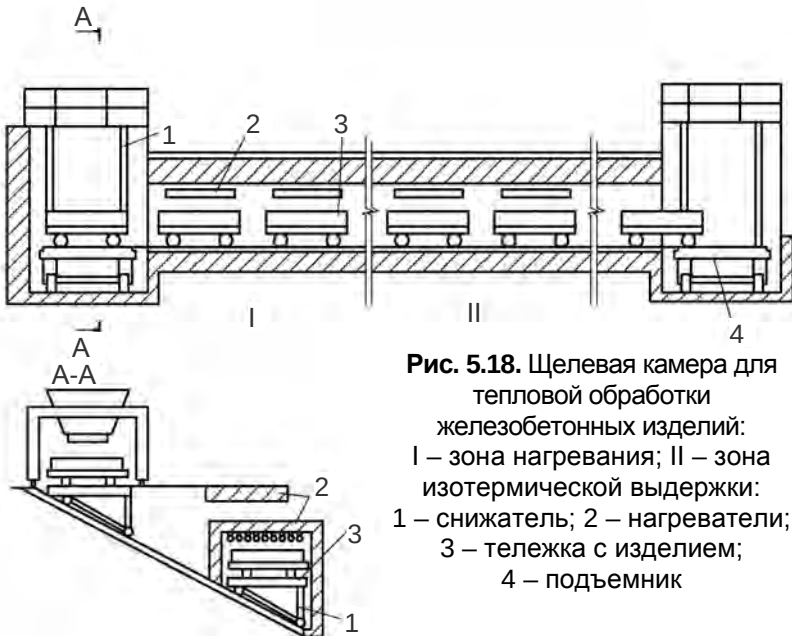


**Рис. 5.18.** Щелевая камера для тепловой обработки железобетонных изделий:

I — зона нагревания; II — зона изотермической выдержки;

1 — сужающий; 2 — нагреватели;

3 — тележка с изделием;

4 — подъемник

С помощью автоклавной обработки получают изделия на основе известково-кремнеземистого и других вяжущих, которые в обычных условиях твердеют очень медленно. Для получения материалов автоклавного твердения можно широко использовать разнообразные отходы промышленности (шлаки, шламы, золы и т.п.).

Ускоренное изготовление изделий на разных вяжущих предусматривает интенсификацию их твердения при одновременном получении материалов нужной структуры. Интенсификация процес-

сов твердения требует учета всех технологических этапов изготовления материала. Нельзя, например, рассматривать ускорение твердения бетона вне комплекса всех воздействий на бетонную смесь и отформованный бетон.

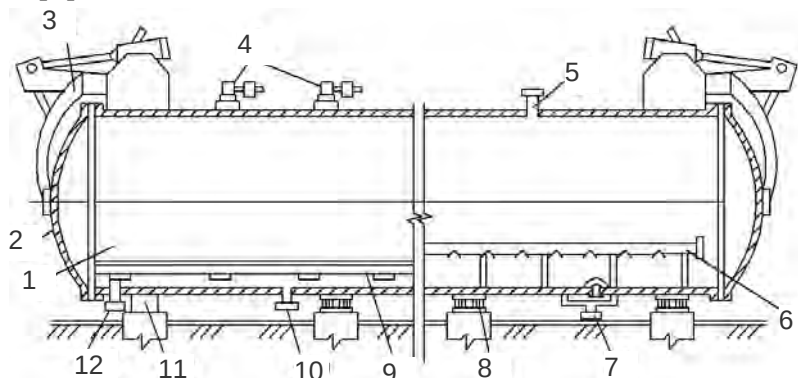


**Рис. 5.19.** Схема автоклавной установки:

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – механизм для закрытия и открытия крышки; 4 – предохранительный клапан; 5 – патрубок для перепуска пара; 6 – перфорированная труба; 7 – патрубок для вывода конденсата; 8 – подвижные опоры; 9 – рельсовый путь; 10 – вакуум-система; 11 – неподвижная опора; 12 – патрубок для введения пара

Окончательный результат различных технологических воздействий на материал зависит от момента их приложения, интенсивности и продолжительности. В частности, применительно к бетонам он определяется соответствием момента приложения воздействий и кинетики структурообразования бетонной смеси, которая характеризуется кривыми роста пластической прочности, тепловыделения, скорости гидратации и т.п. (принцип соответствия по О.П. Мчедлову-Петросяну). Показателями момента приложения и прекращения воздействия на бетонную смесь являются точки перелома кривых, которые характеризуют качественное изменение характера происходящих процессов. Приложение механических воздействий (повторное вибрирование, активизационная обработка и т.п.) в течение оптимального времени дает возможность достичь, например, повышения прочности бетона в 1,5-2 раза, существенно улучшить ряд свойств.

## **ЧАСТЬ II. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Всю совокупность основных материалов, применяемых в строительстве, можно объединить в несколько групп:

- природные каменные материалы;
- материалы, полученные спеканием и плавлением природного сырья (керамика, стекло, металлы);
- минеральные вяжущие вещества и материалы на их основе (вяжущие, бетоны, армированные композиты, растворы);
- материалы на основе древесины;
- органические вяжущие вещества, полимеры и материалы на их основе (битумы, дегти, асфальтовые бетоны, полимеры, пласт-массы).

В книге последовательно рассматриваются ведущие строительные материалы, входящие в указанные группы.

### **6. ПРИРОДНЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

К природным каменным материалам относят материалы, получаемые из горных пород без существенного изменения их состава и структуры. Ряд природных каменных материалов (блоки, плиты, щебень и др.) получают с применением различных видов механической обработки, ряд (гравий, песок, гравийно-песчаные смеси) – без механической обработки.

Природные каменные материалы являются древнейшими строительными материалами. Благодаря широкой распространенности, огромным запасам природного сырья, высоким эксплуатационным характеристикам (прочности, морозостойкости, долговечности и др.) природные каменные материалы находят разнообразное применение в современной строительной практике.

*Горные породы* – это естественные минеральные агрегаты определенного состава и строения, образующие самостоятельные геологические тела, слагающие земную кору. Термин “горные породы” введен в 1798 г. русским минералогом. В.М. Севергиным, который классифицировал их на простые, или мономинеральные, состоящие из одного минерала (кварцевый песок, известняк, яшма и др.), и

## 6. Природные каменные материалы

сложные или полиминеральные, состоящие из нескольких минералов (граниты, порфиры, базальты, сиениты и др.). Наука, изучающая минералогический и химический составы, структуру, распространение, классификацию и условия образования горных пород, называется *петрографией* (греч. петрос – камень и графо – пишу).

### 6.1. Виды и свойства минералов

Минералы (от лат. *minera* – руда) – природные тела с определенным химическим составом и кристаллической структурой. По химическому составу минералы подразделяют на девять классов: силикаты, карбонаты, оксиды и гидроксиды, сульфиды, сульфаты, галлоиды, фосфаты, вольфрамиты, самородные элементы.

Как минералы, слагающие горные породы, и применяемые в производстве природных и искусственные строительных материалов, практическое значение имеют силикаты, карбонаты, сульфаты и оксиды.

**Структура и свойства минералов.** Самыми распространенными в природе минералами являются *силикаты*. Они представляют собой соли кремниевых кислот, среди которых выделяют подгруппы минералов, имеющих некоторую общность состава и строения: полевые шпаты, пироксены, амфиболы, глинистые минералы и др. Особенно велика роль полевых шпатов, которые составляют около 50% (по массе) всей земной коры.

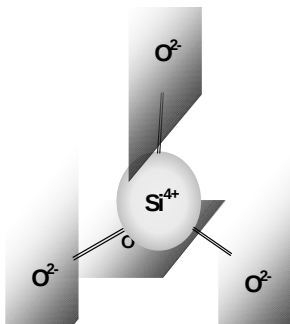


**Рис. 6.1.** Кремнекислородный тетраэдр

Современная классификация силикатов построена по типам их кристаллохимических структур, которые находятся в тесной связи с химическим составом минералов, и определяют их важнейшие физические свойства.

В минералах-силикатах каждый ион кремния  $\text{Si}^{4+}$  связан с четырьмя ионами кислорода. Основной структурной единицей кристаллической решетки силикатов является *кремнекислородный тетраэдр* ( $[\text{SiO}_4]^{4-}$ ), в вершинах которого располагаются ионы кислорода  $\text{O}^{2-}$ , а в центре – ион кремния  $\text{Si}^{4+}$  (рис. 6.1). Он обладает

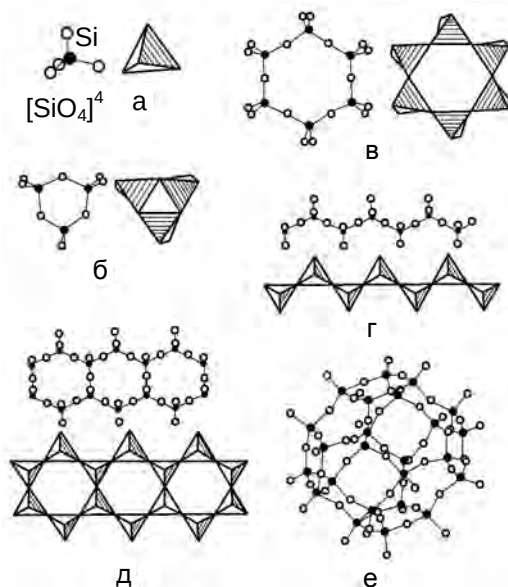


**Рис. 6.2.** Типы структур силикатов:  
 а, б – изолированная (островная)  
 структура; в – кольцевая; г – цепочечная; д – ленточная; е – каркасная

четырьмя свободными валентными связями, чем и определяются различные способы сочленения тетраэдров и присоединение ионов других элементов, входящих в состав силикатов. Кремнекислородные тетраэдры могут быть обособлены один от другого или соединяться с помощью общих кислородных ионов, что приводит к появлению изолированных (островных), цепочечных, ленточных, слоистых, каркасных силикатов (рис. 6.2) и, соответственно, различным свойствам минералов.

Островные силикаты представлены одиночными

или сдвоенными кремнекислородными тетраэдрами, удерживаемыми катионами Mg, Ca и др. Кольцевые силикаты состоят из групп, включающих по 3, 4 и 6 тетраэдров, связанных в кольца. В структуре цепочечных и ленточных силикатов кремнекислородные тетраэдры соединены или в непрерывные цепочки с радикалом  $(\text{Si}_2\text{O}_6)^{4-}$  – цепные силикаты, или в сдвоенные цепочки с радикалом  $(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}$  – ленточные силикаты. Кристаллическая структура листовых силикатов имеет форму лент, соединенных в один непрерывный слой – лист. Каркасные силикаты отличаются трехмерным сцеплением кремнекислородных тетраэдров. В этом случае каждый ион кислорода принадлежит одновременно двум тетраэдрам. Сцепление тетраэдров происходит через все четыре вершины. Характерной особенностью кремнекислородных тетраэдров является способность иона Si частично заменяться ионом Al с появлением в кристаллической решетке алюмокислородных тетраэдров  $[\text{AlO}_4]^{4-}$  и

образованием каркасных алюмосиликатов. Такое свойство химических элементов замещать друг друга в кристаллических структурах, не нарушая их строения, называется *изоморфизмом*.

**Физико-механические свойства минералов** классифицируются на три основные группы: морфологические, оптические механические. Морфологические свойства определяются внешней формой минералов. К оптическим свойствам относятся цвет, прозрачность, блеск; к механическим – твердость, степень спайности, вид излома и др.

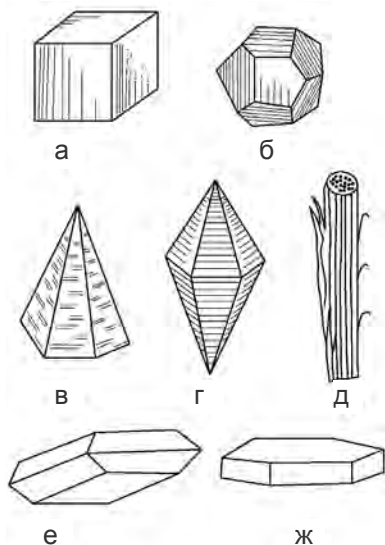


**Рис. 6.3.** Разновидности форм (габитусные типы) минералов: а, б – изометрический тип (пирит и гранат); в, г, д – продолговатый тип (корунд, кварц, асбест); е, ж – сплюснутый тип (гипс, мусковит)

*Форма* – свойство минералов, по которому их можно подразделить на виды или на т.н. габитусные типы (рис. 6.3).

*Цвет* отражает характер взаимодействия световых волн со структурными элементами, входящими в состав кристаллической структуры минералов. Это свойство, в значительной мере предопределяется их химическим составом, а также наличием механических примесей, дефектов структуры, микротрещин и рядом других факторов.

*Блеск* – свойство минерала отражать от своей поверхности часть световых лучей. Число-

вое значение отражающей способности называется показателем отражения, значение которого всегда меньше единицы.

*Прозрачность* минералов тесно связана с блеском и характеризует способность пропускать свет в видимом спектре. В зависимости от коэффициента поглощения света все минералы условно можно разделить на три группы: прозрачные (кварц, алмаз), полупрозрачные (гипс, гематит) и непрозрачные (графит).

*Твердость* минералов – это степень их сопротивления внешнему механическому воздействию, способность противостоять проникновению в них других, более твердых тел. Существует несколько способов определения твердости, среди которых наиболее распространенными и доступными являются определение твердости с помощью склерометра и с помощью шкалы Мооса. Для тонкой инструментальной оценки твердости в лабораторных условиях применяют различные типы склерометров или твердомеров. Этот метод позволяет определить твердость минералов в МПа с точностью до сотых долей и основан на вдавливании под определенной нагрузкой в отшлифованную поверхность минерала или на ровную грань кристалла алмазной либо стальной четырехгранной пирамиды, заостренной под определенным углом. Величина вмятины, образованная при этом на поверхности минерала, дает возможность рассчитать абсолютную твердость  $T$ :

$$T = 2 \sin \frac{\alpha P}{2d^2}, \quad (6.1)$$

где  $\alpha$  – угол между противоположными гранями алмазной (стальной) пирамиды;  $P$  – величина нагрузки;  $d$  – диагональ вмятины.

Значения твердости (микротвердости) для некоторых минералов составляют, МПа: тальк – 25, графит – 100, гипс – 360, апатит – 5300, кварц – 11200, алмаз – 100600. Относительная твердость минералов чаще всего определяется с помощью приближенного метода по шкале, предложенной немецким ученым Ф. Моосом и носящей его имя. В шкале Мооса десять специально подобранных минералов от самого мягкого – талька до самого твердого – алмаза расположены в последовательности, при которой следующий по порядку минерал оставляет царапину на предыдущем, а сам им не прочерчивается. Порядковый номер минерала обозначает его твердость (табл. 6.1).

*Спайность* – способность минералов раскалываться при ударе по определенным направлениям с образованием гладких поверхностей различной степени зеркальности – плоскостей спайности. Она зависит от внутренней структуры кристаллического вещества и не связана с его внешней формой. В зависимости от степени и характера раскола и зеркальности, характерных при дроблении минералов, различают различные степени спайности.

Шкала Мооса для определения твердости минералов

| Относительная твердость | Минерал-эталон | Основные показатели                                           | Группы минералов по твердости |
|-------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1                       | Тальк          | Оставляет следы на бумаге, дереве, коже                       | Мягкие                        |
| 2                       | Гипс           | Чертится ногтем                                               |                               |
| 3                       | Кальцит        | Легко чертится ножом или медной проволокой                    | Средней твердости             |
| 4                       | Флюорит        | Чертится ножом под нажимом                                    |                               |
| 5                       | Апатит         | С трудом царапается ножом                                     |                               |
| 6                       | Ортоклаз       | Слабо царапает стекло при сильном нажиме, ножом не царапается | Твердые                       |
| 7                       | Кварц          | Легко чертит стекло                                           |                               |
| 8                       | Топаз          | Режет стекло                                                  | Очень твердые                 |
| 9                       | Корунд         | Режет стекло при не-сильном нажиме                            |                               |
| 10                      | Алмаз          | Легко режет стекло, царапает и чертит все другие минералы     |                               |

Весьма совершенная спайность образуется когда минерал раскалывается на тончайшие пластинки; совершенная, если при расколе минерала образуются обломки, ограниченные правильными плоскостями с зеркально-гладкой поверхностью; средняя, когда на обломках минерала отчетливо видны как плоскости спайности, так и неровные изломы; несовершенная (или весьма несовершенная), при которой плоскостей спайности почти не видно, а излом обломков неровный или минерал раскалывается по неопределенным направлениям. Спайность чаще относится к отрицательным признакам горных пород как строительных материалов. При совершенной спайности снижаются прочность и стойкость, как самого минерала, так и содержащей его горной породы, затрудняется технологическая обработка.



**Основные породообразующие минералы.** Из множества известных минералов только около 50 участвуют в образовании горных пород. Процентное соотношение породообразующих минералов в составе горных пород может быть самым различным. Так, например, основными минералами гранита являются полевые шпаты (до 60%), кварц (до 40%), слюда, роговая обманка и авгит (вместе до 10%); ангидрит почти полностью состоит из одноименного минерала. К числу главнейших породообразующих минералов относятся полевые шпаты, кварц, слюды, железисто-магнезиальные силикаты, сульфаты, карбонаты.

*Полевые шпаты* – большая и важная в промышленном отношении группа силикатов, являющихся основными породообразующими минералами большинства изверженных (граниты, диориты, габбро, лабрадориты), а также многих метаморфических (гнейсы и др.) пород. По химическому составу полевые шпаты представляют собой алюмосиликаты натрия, калия и кальция.

*Ортоклаз* – калиевый полевой шпат  $K[AlSi_3O_8]$  розово-красного цвета, имеющий две плоскости спайности, расположенные под прямым углом друг к другу. Разновидностью калиевых полевых шпатов является *микроклин*. Это минерал белого, желтого или красного цвета, имеющий чаще всего кристаллы призматической формы. Ортоклаз и микроклин могут замещать друг друга в породах или же присутствовать одновременно.

*Плагиоклазы* – ряд натриево-кальциевых алюмосиликатов от белого до темно-серого цвета. Минералы, входящие в этот ряд, представляют собой изоморфные смеси альбита  $Na[AlSi_3O_8]$  и анортита  $Ca[AlSi_2O_8]$ .

*Кварц*  $SiO_2$  – самый многочисленный представитель класса оксидов и гидрооксидов. Встречается в виде трех главных модификаций:  $\alpha$ -кварц, тридимит и кристобалит. Наиболее изученным является  $\alpha$ -кварц (его обычно называют просто кварцем). Он устойчив при температуре ниже  $573^\circ C$ . Тридимит устойчив в температурном интервале от  $870$  до  $1470^\circ C$ , а кристобалит – при температуре ниже  $1713^\circ C$ . Свойства этих модификаций зависят от плотности упаковки ионов кислорода в кремнекислородных каркасах.  $\alpha$ -Кварц значительно плотнее, чем тридимит и кристобалит и тверже, чем последние. В прямой зависимости от структуры находятся оптические свойства разновидностей кварца. Обычный цвет кварца – молочно-

## 6. Природные каменные материалы

белый или серый. Прозрачную кристаллическую разновидность кварца называют горным хрусталем, черную – морионом, фиолетовую – аметистом. Кварц является химически стойким минералом и накапливается в виде мощных осадочных отложений (пески, песчаники). Он входит в состав гранитов, кварцитов, песчаников, диоритов и др.

*Слюды* – группа минералов, представляющих собой алюмосиликаты слоистой структуры обладающих способностью расщепляться на тончайшие пластинки, что отличает их от других минералов. Слюды входят в состав многих изверженных, осадочных и метаморфических пород. Наиболее распространены два вида слюд: *биотит* – черная железисто-магнезиальная слюда с плотностью 3,0-3,3 г/см<sup>3</sup> и *мусковит* – прозрачная калиевая слюда с плотностью 2,77-3,10 г/см<sup>3</sup>. При выветривании слюды расслаиваются, снижая тем самым прочность горных пород и ускоряя их разрушение.

*Гидрослюды* – слюдоподобные минералы, содержащие значительное количество связанных молекул воды. Они являются результатом выветривания мусковита, биотита и других минералов группы слюд и рассматриваются как промежуточные соединения между слюдами и глинистыми минералами слоистой структуры. Среди этих минералов наибольшее практическое значение имеет *вермикулит*. Он имеет низкую твердость (1-1,5) и плотность (2,4-2,7 г/см<sup>3</sup>), совершенную спайность и способен разделяться на тонкие гибкие неупругие пластинки. При температуре около 1000°C, молекулярная вода, входящая в состав вермикулита превращается в пар с образованием внутреннего давления, под влиянием которого происходит расслоение слоистых пакетов и их разделение. Образование огромного количества воздушных прослоек в кристаллической решетке сопровождается сильным (в 15-25 раз) увеличением объема вспученного вермикулита и уменьшением его средней плотности до 100-300 кг/м<sup>3</sup>. Вспученный вермикулит является хорошим теплоизоляционным и звукопоглощающим материалом.

*Железисто-магнезиальные силикаты* – группа входящих в класс силикатов темноокрашенных минералов, являющихся составной частью основных и ультраосновных изверженных пород – габбро, диабазов, базальтов. Эти минералы отличает повышенная истинная

плотность (3.20-4.35 г/см<sup>3</sup>), а также высокая ударная вязкость, благодаря которой породы, содержащие их, имеют меньшую хрупкость. Твердость – 5,5-7; цвет – от темно-зеленого до черного в зависимости от наличия железа в их составе. Наиболее распространенные минералы этой группы: *пироксены, амфиболы, оливин*.

Основой структуры *сульфатов* являются тетраэдрические анионные группы (SO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup>, которые, связываясь друг с другом с помощью различных катионов, молекул воды и др., образуют разнообразные островные, каркасные, цепочечные, слоистые структуры. Сульфаты характеризуются невысокой твердостью и прочностью, высокой спайностью, светлой окраской.

*Гипс CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O* – кристаллический минерал, обычно слагающий в природе мраморовидные скопления гипсовых пород. Он имеет белый цвет с разнообразными оттенками, стеклянный, иногда матовый блеск, малую твердость (1,5-2), низкую плотность (2,3 г/см<sup>3</sup>), весьма совершенную спайность и листоватый излом, отличается хрупкостью. Максимально растворим в воде при температуре 37-38°C, с повышением температуры растворимость гипса уменьшается. В генетическом отношении гипс относится к типичным химическим осадкам и образует горную породу – гипсовый камень. Вместе с ангидритом широко используется для получения вяжущих веществ.

*Ангидрит CaSO<sub>4</sub>* – безводная и более твердая разновидность гипса, внешне напоминающая мрамор. Является кристаллическим минералом голубовато-белого цвета со стеклянным блеском, имеет невысокую твердость (3-3,5), плотность около 3 г/см<sup>3</sup>. Легко присоединяет в природных условиях воду, переходя в гипс с большим (до 30%) увеличением объема. Является породообразующим минералом в породах одноименного названия.

*Кальцит CaCO<sub>3</sub>* – характерный представитель класса карбонатов, один из наиболее распространенных минералов в земной коре. Встречается в виде кристаллов различной формы, твердость около 3, плотность – 2,6-2,85 г/см<sup>3</sup>. Кальцит слабо растворим в воде, под влиянием углекислоты переходит в бикарбонат кальция Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, который растворяется в воде примерно в 100 раз легче, чем сам кальцит. Поэтому породы, содержащие кальцит, быстро разрушаются при контакте с водой, насыщенной углекислотой. Входит в состав известняков, мраморов, травертинов и др.

*Магнезит*  $MgCO_3$  – минерал, близкий по свойствам к кальциту, но значительно реже встречающийся в природе. Твердость его 3.5-4, истинная плотность  $3,0 \text{ г/см}^3$ . В природе встречается в виде сплошных мраморовидных и плотных масс, которые имеют большое промышленное значение, особенно при производстве высокоогнеупорных изделий. Слагает идентичную горную породу.

*Доломит*  $CaCO_3 \cdot MgCO_3$  – карбонат серовато-белого цвета с различными оттенками, по свойствам занимающий промежуточное положение между кальцитом и магнезитом. Доломит широко распространен в природе как породообразующий компонент одноименных горных пород и доломитизированных известняков.

### 6.2. Горные породы

Классификация горных пород. В зависимости от условий образования горные породы разделяют на три группы: изверженные или магматические (первичные), осадочные (вторичные) и метаморфические (видоизмененные). В своей основе все группы горных пород образовались из магмы – сложного силикатного расплава, который возникает в земной коре в условиях высокой температуры.

*Изверженные (магматические) горные породы* образовались непосредственно из магмы в результате ее охлаждения и застывания и слагают около 90% земной коры. В зависимости от условий остывания магмы среди изверженных пород различают глубинные, или интрузивные (лат. *intrusio* – внедрение) и излившиеся, или эффузивные (лат. *effusio* – излияние).

*Глубинные (интрузивные) породы* возникли в результате постепенного остывания высокотемпературной магмы в недрах земной коры при высоком давлении. В этих условиях все составные части магмы успели выкристаллизоваться, а сами кристаллы достигли значительных размеров, благодаря чему из них образовались массивные плотные породы с полнокристаллической структурой (граниты, габбро, диориты и др.), залегающие, как правило, крупными массивами.

*Излившиеся (эффузивные) породы* сформировались в верхних слоях земной коры вследствие вулканического извержения магмы и в условиях быстрого остывания при низком давлении. Каждой глубинной горной породе соответствует излившаяся, которая образо-

валась из той же магмы, что и глубинная, вследствие чего химический состав их близок.

В химическом составе изверженных горных пород наибольшее значение имеет кремнезем  $\text{SiO}_2$ . За ним идут глинозем ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), оксид магния ( $\text{MgO}$ ), оксиды железа, натрия, калия и других элементов. Из минералов преобладают кварц и силикаты (полевые шпаты, пироксены, амфиболы, слюды и др.). В зависимости от содержания кремнезема изверженные породы классифицируют на кислые, средние, основные и ультраосновные (табл. 6.2).

Таблица 6.2

Классификация изверженных горных пород по содержанию кремнезема

| Химические названия пород | Содержание $\text{SiO}_2$ , % | Виды пород                   |                                     |                 |
|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------|
|                           |                               | глубинные                    | излившиеся<br>(аналоги глубинных)   |                 |
|                           |                               |                              | древние                             | молодые         |
| Кислые                    | Свыше 65                      | Гранит                       | Кварцевый порфир, вулканический туф | Липарит         |
| Средние                   | 52...65                       | Сиенит, диорит               | Ортоклазовый порфир, порфирит       | Трахит, андезит |
| Основные                  | 40...52                       | Габбро                       | Диабаз                              | Базальт         |
| Ультраосновные            | Менее 40                      | Пироксенит, перидотит, дунит | —                                   | Пикрит          |

Эта классификация имеет большое практическое значение с точки зрения выявления закономерностей изменения свойств изверженных пород в зависимости от содержания в них кремнезема. Так, с уменьшением его содержания увеличивается плотность пород, снижается их температура плавления, изменяется окраска от светлой до темной, облегчается обработка камня. При высоком содержании кремнезема в виде зерен кварца механическая обработка камня затрудняется.

*Осадочные горные породы* обязаны своим происхождением экзогенным (внешним) процессам и являются продуктами разрушения и переотложения изверженных и метаморфических горных пород. Этот вид горных пород слагает самые верхние слои литосферы, покрывая своеобразным чехлом породы магматической и метаморфической групп. В общем объеме земной коры они составляют всего

## 6. Природные каменные материалы

---

1%, занимая при этом около 70-75% всей ее площади. Мощность толщи осадочных пород колеблется в очень широких пределах – в одних местах она очень мала, в других исчисляется километрами. Так, например, толща осадочных образований на дне Черного моря достигает 14000 м.

В зависимости от условий образования различают осадочные породы механического, химического и органического происхождения. Общая их особенность – слоистость залегания, связанная с периодическим изменением условий образования.

Породы механического происхождения отлагались в водоемах или на поверхности земли в результате разрушения изверженных пород и их последующего переотложения. Они делятся на рыхлые и сцементированные отложения. Рыхлые (обломочные) отложения могут быть угловатыми (щебень, песок, глина и др.) или окатанными (валуны, галька, гравий). Сцементированные отложения сформировались в результате цементации рыхлых пород. К наиболее характерным представителям сцементированных отложений относятся: песчаник (из кварцевых песков, связанных кремнистым или известковым цементом), брекчия (из сцементированного щебня), конгломерат (из сцементированной гальки).

Породы химического происхождения возникли в процессе высыхания озер и заливов, отделившихся от морских бассейнов, в результате выпадения в осадок различных соединений, образованных при прохождении химических реакций. К ним относятся: гипсовый камень, травертин, доломит, ангидрит и др. Общая особенность таких пород – сравнительно повышенная растворимость в воде, трещиноватость, пористость.

Породы органического происхождения (органогенные) образовались в результате жизнедеятельности растительных и животных организмов. К ним относятся: известняк, диатомит, трепел, мел и др.

*Метаморфические горные породы* образовались путем превращения изверженных и осадочных горных пород в новый вид камня под воздействием внутренних геологических процессов, сопровождаемых значительным давлением и повышенными температурами. В общем объеме земной коры они составляют 4%. Метаморфические изменения могут быть настолько сильными, что меняется не только внешний облик породы, но и ее структура, минералогиче-

ский и химический состав. Полная или частичная перекристаллизация пород часто приводит к появлению новых минералов. Среди метаморфических пород различают массивные (зернистые) породы (кварциты, мраморы) и сланцеватые (гнейсы, сланцы). Гнейсы относятся к метаморфическим изверженным породам, а кварциты, мраморы и сланцы – к метаморфическим осадочным.

**Структура и свойства горных пород.** Каждая горная порода имеет специфическое внутреннее строение, определяемое структурными и текстурными особенностями.

Структура горной породы обусловлена размером, формой и взаимным расположением слагающих ее составных частей. Структуры бывают кристаллические, порфировые, обломочные, стекловатые, оолитовые и др.

Породы с *кристаллической структурой* состоят либо из полных по форме, либо из неполных кристаллов, так называемых кристаллических зерен (в этом случае структуру называют *зернисто-кристаллической*). Кристаллическую структуру имеют кварциты, мраморы, зернисто-кристаллическую – граниты, сиениты.

В породах кристаллической или зернисто-кристаллической структуры кристаллы или зерна срослись друг с другом непосредственно, без какого-либо связывающего вещества.

В породах *порфировой* структуры отдельные кристаллы различных размеров соединены между собой значительным количеством плотного, тонкозернистого или стекловатого вещества (например, у порфиров). Кристаллические породы, близкие по структуре с порфиром, называются порфировидными.

Породы *обломочной* структуры состоят из обломков других ранее образовавшихся, а затем разрушившихся пород. В зависимости от крупности обломков, образующих породу, различают грубообломочную и мелкообломочную структуры.

*Стекловатая* структура характерна для пород, не имеющих кристаллов и по своему виду напоминающих искусственное стекло (обсидиан, базальт).

*Оолитовая* структура встречается у осадочных пород, сохранивших в своем составе остатки мелких организмов – раковины, скелеты например, у известняков-ракушечников).

Кроме понятия “структура” в петрографии употребляется термин *текстура* (сложение), т.е. взаимное относительное расположение

составных частей породы в пространстве без учета формы и размера этих частей. Текстуры подразделяются на массивные, линейно-параллельные, полосчатые, слоистые, пористые. Текстура существенно влияет на долговечность и декоративные качества горных пород.

*Изверженные породы.* Глубинные породы имеют высокие показатели прочности, средней плотности, а также незначительную пористость, с которой связаны весьма низкое водопоглощение, высокие теплопроводность и морозостойкость. К числу главнейших глубинных пород относят гранит, сиенит, диорит, габбро и лабрадорит.

*Граниты* – наиболее распространенные глубинные породы с ярко выраженной зернисто-кристаллической структурой и массивной текстурой (рис.6.4). Впервые термин “гранит” был применен в литературе итальянским минералогом Андреа Цезальпино в 1596 г.

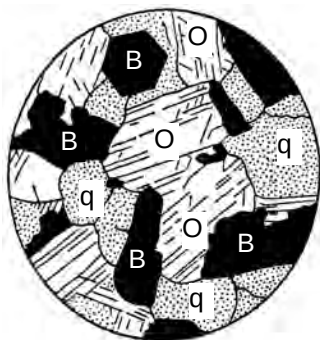


**Рис.6.4.** Полнокристаллическая структура гранита:

О – ортоклаз; В – биотит;  
q – кварц

Граниты состоят из полевых шпатов (обычно 40-60%), кварца (20-40%), слюды, железисто-магнезиальных силикатов – роговой обманки, амфиболов, реже пироксенов (до 10%), которые сообщают светло-серую, или мягко-красную окраску этим породам. По величине зерен различают три структуры гранитов: мелкозернистые (до 2 мм), среднезернистые (от 2 до 5 мм) и крупнозернистые (свыше 5 мм). При большом количестве кварца граниты приобретают высокую твердость и хрупкость, а с увеличением содержания

роговой обманки становятся более вязкими, однако легче выветриваются, особенно при наличии трещин. Мелкозернистые разновидности отличаются более высокими плотностью и прочностью и меньше подвержены процессам выветривания. Предел прочности при сжатии гранитов колеблется от 90 до 280 МПа, при растяжении, от 2 до 7,5 МПа, средняя плотность составляет 2600...2900 кг/м<sup>3</sup>. Они являются малопористыми породами с содержанием пор до 1,5% и незначительным водопоглощением (до 0.5%). Граниты характеризуются высокими морозостойкостью и сопротивлением ис-



тиранию, сравнительно легко поддаются механической обработке (разделке на изделия, шлифованию и полировке), хотя последняя с повышением содержания слюды затрудняется. Граниты недостаточно огнестойки: при нагревании до 900°C и выше они резко снижают прочность в связи с полиморфными превращениями кварца.

Благодаря высоким механическим показателям и эксплуатационным свойствам, граниты находят широкое применение в строительстве.

*Сиениты* – глубинные зернисто-кристаллические породы, отличающиеся от гранитов отсутствием (или незначительным содержанием) свободного кварца и, как следствие, лучшей обрабатываемостью, а также менее четко выраженной зернистостью.

*Диориты* – глубинные зернисто-кристаллические породы, состоящие в основном из плагиоклаза (до 75%) и роговой обманки.

Цвет диоритов от серого до темно-зеленого и черного. Средняя плотность их 2700-2900 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии (150-300 МПа) в среднем выше, чем у гранитов и сиенитов. Структура мелко-, средне- и крупнозернистая, текстура массивная. Диориты отличаются высокой вязкостью, хорошей сопротивляемостью удару и истиранию, а также стойкостью против выветривания. Из глубинных пород диориты уступают в легкости обработки только сиенитам. Эти свойства позволяют использовать диориты в качестве материалов, противодействующих различным вибрационным воздействиям (подпорные камни, фундаменты мостовых сооружений и др.), а также применять как ценный декоративный материал. При обработке диоритам придают в основном фактуру скалывания и применяют получаемые изделия для наружной облицовки зданий.

*Габбро* – глубинные зернисто-кристаллические породы, состоящие из плагиоклаза (до 70%), роговой обманки и биотита. Цвет габбро от темно-серо-зеленого до черного, средняя плотность 2800-3100 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии 200-300 МПа. Структура мелко-, средне- и крупнозернистая, текстура обычно массивная. Габбро отличается повышенной вязкостью и стойкостью против выветривания. Применяется в дорожном строительстве и в качестве облицовочного камня (преимущественно мелкозернистые зеленоватые-черные и черные разновидности габбро).

Лабрадориты при раскалывании дают неровную поверхность, затрудняющую обработку скалывающим инструментом. В то же вре-

## 6. Природные каменные материалы

мя, они достаточно хорошо поддаются резанию и шлифованию. Характерная особенность лабрадоритов – *ирризация* (характерное отражение световых лучей от внутренних поверхностей спайности), обусловленная специфическими свойствами минерала лабрадора, – придает камню особенную декоративность, за счет серой и черной окраски с красивыми переливами в синих и зеленых тонах. Некоторые разновидности лабрадорита содержат до 2000...3000 ирризирующих кристаллов размером до 60...80 мм в поперечнике на 1 м поверхности.

*Лабрадориты* – глубинные зернисто-кристаллические породы генетически связанные с габбро, главной составной частью которых является минерал лабрадор.

Лабрадориты применяются для наружной и внутренней облицовки, покрытий полов, деталей памятников главным образом в полированной фактуре, реже в фактурах скалывания (“скала”, точечная и т. п.).

Излившиеся породы являются аналогами глубинных по составу, но сильно отличаются от них по структурным и текстурным особенностям. Наличие неполнокристаллической и стекловатой структур, а также немассивной часто пористой текстуры неблагоприятно отражается на стойкости их к выветриванию и стабильности прочностных показателей. Однако среди пород этого типа имеется немало плотных и прочных разновидностей, широко применяемых в строительстве (порфиры, андезиты, диабазы, базальты. и др.).

*Порфиры* – излившиеся породы, имеющие две разновидности: кварцевую (аналоги гранитов) и бескварцевую (аналоги сиенитов). Цвет порфиров от красно-бурого до серого с разнообразными оттенками. Средняя плотность их 2400-2500 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии 120-130 МПа.

*Андезиты* – излившиеся аналоги диоритов темно-серого или темно-красного цветов. Отличаются пористой текстурой и порфировой структурой с вкрапленниками плагиоклазов или роговой обманки. Средняя плотность их 2700-3100 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии от 140 до 250 МПа в зависимости от пористости. Андезиты используются как дорожный камень для получения кислотоустойких изделий; пористые легкие разновидности идут на изготовление стенового материала.

*Диабазы* – древние излившиеся аналоги габбро. Имеют обычно скрытокристаллическую структуру характерную тем, что промежутки между переплетенными кристаллами основного плагиоклаза (лабрадора) заполнены мелкозернистой авгитовой массой. Цвет их от темно-серого до черного, иногда с зеленоватым оттенком. Диабазы отличаются большой вязкостью и малой истираемостью. Средняя плотность пород  $2900-3100 \text{ кг/м}^3$ , предел прочности при сжатии около 250 МПа, а у отдельных разновидностей до 400 МПа. Обработка их затруднена из-за значительной вязкости. Область использования диабазов в строительстве: архитектурно-строительные изделия для наружной облицовки зданий, бортовые камни, брусчатый камень. Высокая кислотоустойчивость позволяет применять эти породы в качестве материала для кислотоупорной футеровки. Диабазы (как и базальты) могут успешно использоваться для получения каменного литья.



**Рис. 6.5.** Структура базальта

Базальты – излившиеся аналоги габбро темно-серого или черного цветов с синеватым оттенком (рис. 6.5). Структура базальтов в зависимости от условий остывания может быть стекловатой или скрытокристаллической.

Базальты в большинстве своем являются плотными и высокопрочными породами, однако среди них есть также пористые разновидности. В базальтах часто встречаются различные включения (ксенолиты), снижающие их качество как строительных материалов. Они являются твердыми и одновременно хрупкими труднообрабатываемыми породами; их прочность варьируется в широких пределах от 100 до 500 МПа и в связи с большим содержанием

Долговечность их неодинакова и зависит от петрографического состава, характера структуры и пористости. Наиболее долговечны породы с минимальным содержанием кристаллической фазы – базальты порфировидной структуры с кристаллическими вкраплениями разных размеров.

Базальты в большинстве своем являются плотными и высокопрочными породами, однако среди них есть также пористые разновидности. В базальтах часто встречаются различные включения (ксенолиты), снижающие их качество как строительных материалов. Они являются твердыми и одновременно хрупкими труднообрабатываемыми породами; их прочность варьируется в широких пределах от 100 до 500 МПа и в связи с большим содержанием

стекла может резко падать; средняя плотность составляет 3000-3300 кг/м<sup>3</sup>.

Наиболее ценными считаются мелкозернистые базальты, не содержащие стекла и оливина. Базальты являются хорошими кислотоупорными и электроизоляционными материалами и высоко ценятся как сырье для каменного литья. Литой камень используется для получения отделочных изделий, труб, химической аппаратуры, отличающихся кислотоупорностью, высокой прочностью и долговечностью.

*Вулканические туфы* – пористые породы, образовавшиеся из уплотненного и сцементированного вулканического пепла (рис. 6.6). Они различны по строению и характеризуются непостоянными химическими и физико-механическими свойствами. Наиболее ценными считаются камневидные туфы с повышенным содержанием растворимого кремнезема – *трассы*, употребляемые в качестве гидравлических добавок к цементу. Рыхлые землистые разновидности их называются *пуццоланами*.



**Рис. 6.6.** Вулканический туф

Вулканические туфы отличаются стойкостью к выветриванию, малой теплопроводностью, хорошей морозостойкостью, легко обрабатываются, но не полируются. Их отличает большое разнообразие расцветок, придающее породе повышенную декоративность. Прочность их составляет 5-20 МПа, более плотных – до 50 МПа, а средняя плотность – 800-2000 кг/м<sup>3</sup>.

В современном строительстве туфы применяются как местные материалы в виде стеновых камней и блоков, бутового камня, а также в качестве облицовочных плит преимущественно для наружной отделки зданий.

**Осадочные породы.** Осадочные породы резко отличаются от изверженных пород, как по своему составу, так и по строению. Для большинства осадочных пород характерно слоистое сложение и

значительная пористость. Последняя особенно важна, так как оказывает большое влияние на физико-механические свойства пород: прочность, плотность и среднюю плотность, водопоглощение, морозостойкость, механическую обработку и др. Осадочные породы отличаются многообразием структур с широким варьированием формы, размеров частиц и их соотношения. Для них характерно значительное разнообразие минеральных компонентов. Среди породообразующих минералов встречаются осажженные из водных растворов карбонаты, сульфаты, водный кремнезем; продукты выветривания материнских пород – каолинит, монтмориллонит; слюдястые минералы, гидроксиды алюминия и железа, реликтовые минералы, сохранившиеся без изменения, – магматический кварц, полевые шпаты, а также обломки пород различного генезиса и остатки организмов.

*Породы обломочного происхождения* являются продуктами механического разрушения материнских пород, они сложены преимущественно обломками устойчивых к выветриванию минералов и пород. Осадочные породы этого типа разделяются на грубо-, средне- мелко- и тонкообломочные. Среди них только глинистые породы являются продуктами химического разложения материнских пород, остальные же породы сложены обломками, не подвергшимися существенному выветриванию. Независимо от размеров частиц обломочные породы могут быть рыхлыми или сцементированными.

Из рыхлых грубообломочных пород выделяют породы, состоящие из обломков размером 100-1000 мм, называемые *валунами* (окатанные) или *глыбами* (угловатые); 10-100 мм – галькой (окатанные) или *щебнем* (угловатые), 1-10 мм – *гравием* (окатанные) или *дресвой* (угловатые).

*Песчаные* (среднеобломочные) породы представляют собой рыхлую смесь зерен с размерами 0,1-1 мм. Их принято разделять по крупности зерен на крупнозернистые с диаметром частиц 0,5-1 мм; среднезернистые – 0,25-0,5 мм; мелкозернистые – 0,1-0,25 мм. По минералогическому составу пески могут быть моно- и полиминеральные. Наиболее распространенной мономинеральной породой является кварцевый песок. В составе полиминеральных песков чаще всего встречаются минералы наиболее устойчивые при выветривании – кварц, полевые шпаты, слюды, магнетит.

*Глинистые* (тонкообломочные) породы состоят более чем наполовину из мельчайших (менее 0,001-0,01 мм) чешуеобразных частиц глинистых минералов, среди которых не менее 25% имеют размеры меньше 0,001 мм. Глины образуются при выветривании полевошпатовых и некоторых других силикатных пород и состоят преимущественно из глинистых минералов типа каолинита, монтмориллонита и гидрослюд с примесью кварца, слюды, вторичного кальцита, опала и др. Они очень широко распространены на земной поверхности и составляют 50% общего объема осадочных горных пород.

К группе глинистых пород тесно примыкают *аргиллиты* – плотные, обезвоженные, частично перекристаллизованные глины. Одной из разновидностей аргиллитов являются глинистые сланцы. Глинистые породы широко используются в керамической промышленности.

Цементированные обломочные породы образовались путем цементации рыхлых пород разнообразными химическими веществами (рис. 6.7). Среди цементированных обломочных пород наибольшее значение в строительстве имеют *песчаники* (рис. 6.8), т.е. цементированные кварцевые пески. В зависимости от цементирующего вещества различают песчаники глинистые, мергелистые, известковые, кремнистые, битумные и др. Окраску песчаникам придают цементирующие вещества. Для строительства наиболее часто используют кремнистые и известковые песчаники. Первые цементированы кремнеземом, вторые – кальцитом. Наиболее стойки и прочны кремнистые песчаники – предел прочности их при сжатии достигает 250 МПа. Вследствие большой средней плотности (до 2700 кг/м<sup>3</sup>) и высокой теплопроводности песчаников их можно применять только для стен неотапливаемых зданий, фундаментов, подпорных стенок, набережных, для устройства ступеней и тротуаров, а особенно стойкие – для облицовки зданий и сооружений (опор мостов и др.). Песчаники используют также в виде щебня и бута; щебень применяют для приготовления бетона (в качестве крупного заполнителя), в дорожном строительстве.

*Конгломераты и брекчи* – обломочные породы карбонатного, реже силикатного состава в виде соответственно гальки или щебня, связанных природным цементом в монолитную массу. Средняя плотность их  $2600-2850 \text{ кг/м}^3$ , прочность при сжатии от 50 до 160 МПа. Разнообразные формы, размеры и окраски включений придают конгломератам и брекчиям высокую декоративность, что позволяет их использовать как облицовочный материал. Также применяются в дорожном строительстве.

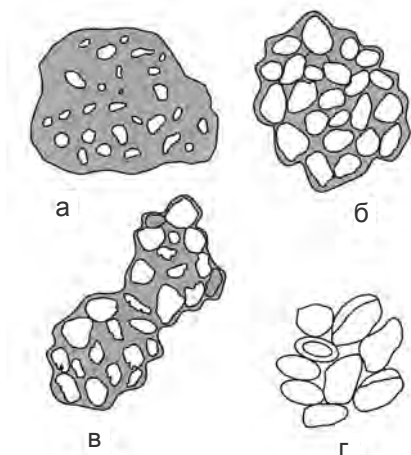


**Рис. 6.7.** Типы цементации осадочных пород:

а – базальный; б – поровый;  
в – контактовый; г – обрастания

*Породы химического происхождения* (хемогенные) образовались в результате выпадения из истинных и коллоидных водных растворов различных веществ, главным образом карбонатного и сульфатного состава. Важным структурным признаком этих пород являются форма и размеры зерен с характерным для них появлением оолитов – скорлуповатых зерен округлой или эллипсоидальной формы размером 1-5 мм и сферолитов – кристаллических агрегатов

игольчатого строения, а также зернистых структур. Текстуры химических пород аналогичны обломочным. Окраска их разнообразна и зависит от примесей.

К карбонатным породам относятся *известняки, доломиты и магнезиты*. Породообразующими минералами известняков являются минералы кальцит или реже арагонит ( $\text{CaCO}_3$ ). Порообразующими минералами доломитов и магнезитов служат одноименные минералы  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  и  $\text{MgCO}_3$ .

Пористость сцементированных известняков и доломитов не превышает десятых долей процента, а у слабосцементированных может достигать 20% и выше. Средняя плотность этих пород изменяется в пределах  $1900-2600 \text{ кг/м}^3$ , снижаясь до  $1000 \text{ кг/м}^3$  у сильнопористых

и кавернозных разновидностей; предел прочности при сжатии 10-100 МПа.

Основными направлениями применения известняков является использование их как природного камня и сырья для производства вяжущих материалов. Доломиты и магнезит применяют кроме того для производства огнеупоров.

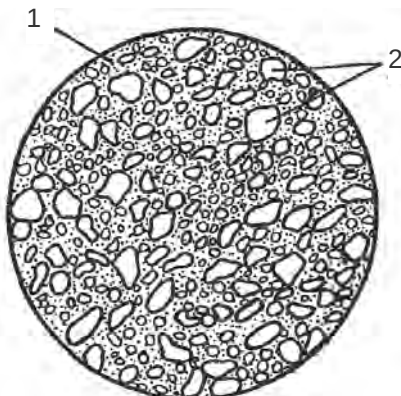


**Рис. 6.8.** Зернистая структура песчаника:  
1 – цементирующее вещество; 2 – зерна песка



**Рис. 6.9.** Структура оолитового известняка

*Оолитовые известняки* сложены оолитами кальцита, равномерно погруженными в цементирующую массу  $\text{CaCO}_3$  или, реже, глины и плотно соприкасающимися между собой (рис. 6.9). Они – пористые, малоустойчивые к выветриванию и недостаточно морозостойкие породы. Прочность наиболее плотных их разновидностей мала и составляет всего 15...20 МПа. Применяют их для изготовления воздушной и гидравлической извести, цемента, реже как стеновой материал.

*Известняковые туфы* имеют высокопористую ноздреватую структуру, состоят из кальцита, выпадающего из холодных и горячих углекислых источников при выходе их на поверхность земли. Они отличаются легкостью, небольшой средней плотностью до  $1700 \text{ кг/м}^3$  и малой прочностью, обычно около 10 МПа, хотя у плотных разновидностей (*травертин*), она может достигать 80 МПа. Известковые туфы применяют в качестве стенового и декоративного материала.



Главными представителями сульфатных пород являются *гипс* (*гипсовый камень*) и *ангидрит*. Они имеют зернистокристаллическую структуру и сложены из минералов одноименного названия с возможными примесями глины, песка, органических веществ. В зависимости от примесей окрашены в белый, серый, желтоватый, коричневый цвет. Характеризуются пределом прочности при сжатии около 25 МПа и средней плотностью 2100-2300 кг/м<sup>3</sup>. Ангидриты – более плотные породы с пределом прочности при сжатии до 60 МПа, залегающие обычно совместно с гипсом. Гипс и ангидрит служат сырьем для производства вяжущих, а также стеновых и отделочных материалов.

*Породы органогенного происхождения* разделяют на породы кремнистого (силициты) и карбонатного состава, а также фитогенные и зоогенные (по преимущественному происхождению от растений или животных организмов).

Главными представителями кремнистых пород являются диатомиты, трепелы и опоки. *Диатомиты* образуются из скорлупок диатомовых водорослей, живущих в пресной и соленой воде. Их плотность 400-900 кг/м<sup>3</sup>. *Трепелы* по внешнему виду, составу и свойствам весьма схожи с диатомитами и отличаются несколько большей средней плотностью. Диатомиты и трепелы характеризуются огне- и кислотоупорностью, плохо проводят звук и тепло, используются как адсорбенты, изоляционные и фильтрующие материалы.

*Опоки* – породы, образованные вследствие уплотнения и цементирования трепелов и диатомитов. Цементирующим веществом является аморфный кремнезем, иногда карбонат кальция, средняя плотность 800-1600 кг/м<sup>3</sup>, прочность 1-10 МПа. Применяются в качестве стеновых материалов, заполнителей и добавок для бетонов.

*Органогенные карбонатные породы* состоят преимущественно из кальцита с примесями кремнезема, глинистых и песчаных частиц и пр. Широко распространены органогенные известняки, образованные путем накопления продуктов жизнедеятельности организмов на дне мелководных водоемов: ракушечники, коралловые известняки, мел.

**Метаморфические породы.** Главными представителями метаморфических горных пород являются: гнейсы, сланцы, кварциты, мрамор.

*Гнейсы* – кристаллически-зернистые породы, образовавшиеся в результате перекристаллизации гранитов и других изверженных пород при высокой температуре и большом одноосном давлении, обусловившем их слоистое (сланцеватое) строение (рис. 6.10). По минералогическому составу гнейсы похожи на граниты, диориты, сиениты и др., но отличаются от них тем, что минералы в них рас-



**Рис. 6.10.** Слоистая текстура гнейса

положены не беспорядочно, как в магматических породах, а ориентированно, с чем связано появление анизотропии свойств породы.

Средняя плотность их составляет  $2500\text{--}2600 \text{ кг/м}^3$ , предел прочности при сжатии  $120\text{--}300 \text{ МПа}$  (обычно этот показатель примерно в 2 раза ниже при приложении силы перпендикулярно сланцеватости).

Слоистость облегчает добычу и переработку гнейсов, но при этом образуется нежелательная лещадность щебня. Они используются в виде облицовочных плит, для

кладки фундаментов, в качестве бутового камня и др. Гнейсы являются самыми распространенными метаморфическими породами.

*Сланцы* – плотные и твердые породы сланцеватого строения (рис. 6.11), образовавшиеся в основном из глин, сильно уплотнившихся и частично перекристаллизовавшихся под большим одноосным давлением. В зависимости от состава различают сланцы глинистые, песчано-глинистые, углисто-глинистые, хлоритовые, тальковые, слюдяные и т. д. Цвет сланцев темно-серый, черный, коричнево-серый, красно-коричневый и т. п. Средняя плотность их  $2700\text{--}2900 \text{ кг/м}^3$ , предел прочности при сжатии от 60 до 250 МПа, пористость 0,3–3%. Большинство сланцев имеет высокую долговечность. Они отличаются способностью раскалываться на ровные тонкие пластинки и, обладая достаточной плотностью, вязкостью,

твердостью и водостойкостью, используются как местный кровельный материал.

Ценным свойством *шунгитовых сланцев* является их способность превращаться при обжиге в легкий пористый заполнитель – *шунгизитовый гравий*. Особенностью шунгизитового гравия является наличие стекловатой структуры и инертность по отношению ко всем агрессивным средам.



**Рис. 6.11.** Слоистый мусковит – кварцевый сланец

*Кварциты* – мелкозернистые породы, образовавшиеся при перекристаллизации кремнистых песчаников и состоящие в основном из кварцевых зерен, связанных кремнистым цементом (рис. 6.12).



**Рис. 6.12.** Мозаичный микрокварцит

Средняя плотность 2700-3000 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии достигает 400 МПа. Кварциты отличаются слабым сцеплением с вяжущими, большой хрупкостью и трудно обрабатываются; имеют высокую огнеупорность, кислото- и щелочестойкость и применяются главным образом в производстве огнеупорного материала - динаса, а также в качестве абразивных, кислото- и щелочестойких материалов.

*Мраморы* – зернисто-кристаллические породы с массивной или слоистой текстурой, образовавшиеся в результате перекристаллизации известняков и доломитов под воздействием высокой температуры и больших давлений. Они

состоят из кальцита, иногда с примесью доломита, магнезия и марганца. Кристаллы кальцита часто видны невооруженным глазом и

## 6. Природные каменные материалы

---

прочно соединены между собой без цементирующего вещества. Мрамор бывает белоснежный или розовый, желтый, красный, черный и других цветов (в зависимости от примесей); в нем часто имеются прожилки и узоры.

В современном строительстве под термином “мрамор” понимают часто как собственно мрамор, так и другие плотные переходные карбонатные породы, легко поддающиеся полировке: мраморовидные известняки и доломиты и др. Средняя плотность мраморов 2700-2800 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии от 40 до 170 МПа.

Мраморы хорошо обрабатываются – пилятся, шлифуются и полируются, но слабо сопротивляются выветриванию, особенно влиянию воды, содержащей растворенную углекислоту. Мраморы широко применяются для декоративных и внутренних отделочных работ, а в виде крошки – при приготовлении цветных штукатурок, облицовочного декоративного бетона.

### 6.3. Свойства горных пород и виды природных каменных материалов

**Свойства горных пород.** Область использования природного камня определяется его физико-механическими свойствами, обусловленными особенностями образования, химико-минералогическим составом, структурой и текстурой. Значения показателей основных базовых свойств ряда строительных горных пород приведены в табл. 6.3.

При преобладании в породах стекла прочность их снижается, они более подвержены воздействию температурных изменений. Более высокой прочностью обладают мелкозернистые породы, сложенные из зерен неправильной, зазубренной формы.

В горных породах, особенно осадочных, встречаются слабые разновидности, содержащиеся в виде отдельных слоев или прослоек. Однородность прочностных свойств породы является важнейшим показателем их качества.

При выборе вида камня существенное значение имеет его средняя плотность, которая для горных пород определенного минерального состава и структуры служит косвенной характеристикой их прочности и долговечности. По мере увеличения основности по-

род, отношения процентного содержания основных оксидов и кислотных, плотность пород обычно возрастает.

Таблица 6.3

Основные физико-механические свойства  
некоторых горных пород

| Порода              | Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> | Предел прочности при сжатии, МПа | Водопоглощение, % | Истираемость, г/см <sup>2</sup> |
|---------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| Гранит              | 2500...2700                          | 100...250                        | 0,1...1           | 0,1...0,5                       |
| Базальт             | 2200...3000                          | 200...300                        | 0,01...0,2        | 0,4...1                         |
| Известняки плотные  | 1800...2700                          | 3,5...200                        | 0,5...30          | 2...5                           |
| Известняки пористые | 900...2000                           | 0,4...20                         | 6...40            | —                               |
| Песчаники           | 1900...2800                          | 10...200                         | 0,2...2,5         | 0,1...2                         |
| Гнейсы              | 2400...2800                          | 50...240                         | 0,1...1           | —                               |
| Кварциты            | 2500...2700                          | 120...400                        | 0,01...0,2        | 0,1...3                         |

Морозостойкость большинства пород может быть определена по водопоглощению. Водопоглощение плотных магматических пород, не подвергшихся процессам выветривания, обычно не превышает 0,7%, для осадочных пород достигает 10% и более.

У малопористых разновидностей мономинеральных пород значения показателей прочности, плотности, упругости и некоторых других свойств приближаются к величинам показателей тех же свойств породообразующего минерала. С увеличением пористости, а также с появлением неплотностей в контактах и некоторых других структурных дефектов, неизбежно возникающих при формировании горных пород, их упругие и прочностные свойства интенсивно снижаются.

Свойства полиминеральных пород в первую очередь обусловлены влиянием количественно преобладающего минерала. Например, у гранитов, с увеличением содержания кварца, имеющего очень вы-

## 6. Природные каменные материалы

---

сокий предел прочности при сжатии повышается механическая прочность. Увеличение содержания полевых шпатов, прочность которых примерно на порядок меньше прочности кварца, наоборот, снижает прочность гранитов. Слюда с характерной ей высокой спайностью и слоистой структурой способствует механическому разрушению гранита с появлением внутренних раскалывающих напряжений.

Породы, обладающие однородно-кристаллическим строением, имеют наибольшую прочность при сжатии, незначительную пористость и водопоглощение, устойчивы к воздействию внешних агрессивных факторов. При скрытокристаллической (афанитовой) структуре свойства пород близки к полнокристаллическим. Однако при преобладании в породе стекловатой фазы прочность и долговечность ее снижается.

Гладкозернистые породы обладают меньшей прочностью по сравнению с породами, содержащими зерна неправильной зазубренной формы. Мелкозернистые породы характеризуются более высокой прочностью, чем крупнозернистые.

При порфировой структуре породы большое значение имеет строение, как основной массы, так и вкрапленников. Если основная масса имеет микрокристаллическую структуру, а вкрапленники сложены прочными и устойчивыми минералами, породы обладают достаточно высокой прочностью. При стекловатой основной массе и нестойких к выветриванию вкрапленниках (слюда, плагиоклаз) стойкость породы невысокая.

Полосчатая, слоистая и гнейсовидная текстуры изверженных и метаморфических пород также способствует снижению прочности, особенно если напряжение направлено параллельно полосчатости или слоистости. При наличии в породе мелких пустот, расположенных параллельно полосчатости, прочность ее еще более снижается, так как это способствует проникновению воды к слоям.

Свойства многих осадочных полиминеральных пород, представляющих собой агрегаты неодинаковых по размеру обломков минералов, обуславливаются как свойствами самих обломков, так и свойствами природного вяжущего вещества, выполняющего роль матрицы. Наиболее прочными среди таких природных цементов являются кварцевый и кремнистый равномерно-зернистые цементы. Значительно уступают им по прочности цементы, состоящие из минеральных зерен различного состава с неодинаковыми размерами

частиц, а также глинистые и растворимые соединения (глины, гипсы и пр.).

Характер пористости в горных породах может быть разнообразным и иметь широкий диапазон значений. Для туфов, например, характерны преимущественно крупные макропоры, а для диатомитов – тончайшие, трудноразличимые микропоры. Первичная пористость, возникшая в процессе формирования породы, является обычно закрытой и тонкодисперсной. Она зависит от характера упаковки, формы и размера частиц, их взаимного расположения, а также величины первоначального давления. Вторичная пористость, чаще всего открытая, возникает на более поздних стадиях образования породы при растворении или замещении в ней отдельных минералов и, особенно, в результате последующего выветривания.

Как важный структурный элемент, поры совместно с минеральными частицами активно участвуют в формировании свойств горных пород. Установлено, что при пористости меньше 1%, упругие и прочностные свойства минералов и горных пород определяются в основном их минеральным составом. При увеличении пористости значения этих свойств уменьшаются в соответствии с эмпирической зависимостью:

$$\lg \frac{P}{P_0} = a\Pi_2 - b\Pi_1, \quad (6.2)$$

где  $P$  и  $P_0$  – свойства камня соответственно с порами и без пор;  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  – значения первичной и вторичной пористости.

По степени пористости горные породы делятся на три группы: низкой ( $\Pi < 5\%$ ), средней ( $\Pi = 5 \dots 20\%$ ) и высокой пористости ( $\Pi > 20\%$ ).

Как уже отмечалось, наиболее высокой пористостью обладают некоторые осадочные породы, в частности туфы. Магматические породы обычно являются низкопористыми, за исключением сильно выветрелых.

Повышение прочности при уменьшении пористости объясняется тем, что увеличивается площадь контакта между зернами, слагающими породу. Например, прочность известняков возрастает с 5 до 180 МПа при уменьшении пористости с 40 до 2%. Общий характер влияния пористости на механические свойства пород приведен на рис. 6.13.

При использовании горной породы в качестве облицовочного камня, важное значение имеет ее декоративность. В качестве облицовочных применяют камни светлой окраски (розовые, красные и серые граниты, белые и цветные мраморы) и темноокрашенные по-

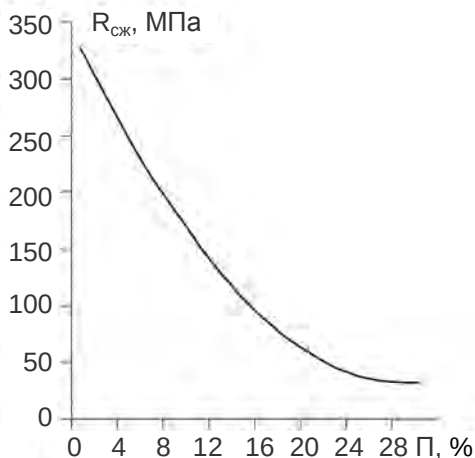


**Рис. 6.13.** Связь между прочностью и пористостью пород

роды (диориты, базальты, черные мраморы). Цвет горной породы определяется цветом слагающих ее минералов. Глубинные породы чаще всего окрашены в красные, серые и розовые цвета, зависящие от цвета количественно преобладающего полевого шпата.

Наибольшее практическое значение имеет идиоохроматическая окраска, обусловленная хромофорами, которыми могут быть как основные ионы минералов,

так и изоморфные примеси. Главнейшими хромофорами являются титан, ванадий, хром, марганец, железо, кобальт, никель, медь. Причем главная роль принадлежит железу в форме ионов  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ , затем титану, марганцу и хрому. Гораздо реже окраска минералов связана с присутствием никеля, меди, ванадия, кобальта.

Важное значение для определения декоративных свойств камня имеет также и стойкость окраски, которая может очень значительно изменяться. Как правило, изверженные породы обладают достаточно стойкой окраской, медленно поддающейся изменениям под влиянием процессов выветривания. Менее стойкой является окраска осадочных и метаморфических пород, иногда сравнительно быстро исчезающая на открытом воздухе.

Для природных каменных материалов существенное значение имеет их способность обрабатываться. Горные породы, обладающие высокой стойкостью, труднее обрабатываются.



Камни, обладающие крупнокристаллической структурой, скалы-вающими инструментами обрабатываются хуже, чем мелкокристаллические, так как на обрабатываемой поверхности могут образовываться выколы по граням кристаллов или плоскостям спайности. Значительно затрудняет обработку камня наличие в нем включений более твердых или более мягких, чем основная масса породы.

**Виды природных каменных материалов.** Природные каменные материалы в зависимости от способа добычи и дальнейшей обработки делятся на две группы: штучные камни, добываемые в виде блоков и каменные материалы неправильной формы. К первой группе относятся пиленые, колотые, шлифованные и полированные изделия, ко второй – преимущественно рваные, дробленые и фракционированные.

Основные направления применения в строительстве различных изделий из природного камня приведены в табл. 6.4.

Основными видами штучных изделий из природного камня являются облицовочные и стеновые блоки и плиты (рис. 6.14). Изготавливают также изделия и детали специального назначения: для устройства ледорезов, мостовых опор, строительства набережных, шлюзов, плотин, подземных коллекторов, монументальных и скульптурных сооружений и др.

Таблица 6.4

Применение различных видов камня в строительстве

| Назначение         | Вид материалов и изделий из природного камня                     | Рекомендуемые горные породы                                                                       |
|--------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Фундаменты         | Бутовый камень, пиленые и колотые камни                          | Все виды плотных пород                                                                            |
| Стены              | Стеновые (пиленые) камни, крупные стеновые блоки, тесаный камень | Пористые породы – известняки, вулканические туфы, доломиты                                        |
| Наружная облицовка | Облицовочные плиты и камни, профильные элементы                  | Граниты, лабрадориты, габбро, базальты, вулканические туфы, кварциты, плотные известняки, мраморы |

| Назначение                                         | Вид материалов и изделий из природного камня                       | Рекомендуемые горные породы                                                 |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Внутренняя облицовка                               | Облицовочные плиты, профильные элементы                            | Мраморы, мраморизованные известняки, гипсы, травертины, вулканические туфы  |
| Наружные лестницы и площадки, парапеты, ограждения | Ступени, плиты для площадок и стенок, облицовочные плиты           | Граниты, сиениты, диориты, габбро, базальты, песчаники                      |
| Внутренние лестницы и площадки, полы               | Плиты для лестничных площадок и полов, ступени                     | Мраморы, граниты, лабрадориты                                               |
| Покрытия и основания автомобильных дорог           | Камни бортовые, брусчатка, камень колотый, щебень                  | Граниты, диориты, габбро, базальты, песчаники, известняки плотные           |
| Гидротехнические сооружения                        | Бутовый камень, пиленые, колотые, дробленные камни, валуны, щебень | Плотные известняки, доломиты, песчаники, граниты, диориты, габбро, базальты |
| Заполнители бетонов: тяжелых<br><br>легких         | Дробленый камень, отходы от добычи штучного камня                  | Изверженные породы, плотные известняки, доломиты, песчаники                 |
|                                                    | То же                                                              | Известняки пористые, вулканические туфы и шлаки                             |

Для получения *облицовочных изделий* наибольшее применение находят магматические породы группы гранита и метаморфические – мраморы и кварциты. Осадочные породы – известняки, песчаники, доломиты, травертины и гипсы – применяются, главным обра-

зом, для внутренних облицовок. Наибольшей долговечностью обладают кварциты и граниты, значительно менее долговечны мраморы, которые на открытом воздухе могут быстро разрушаться.

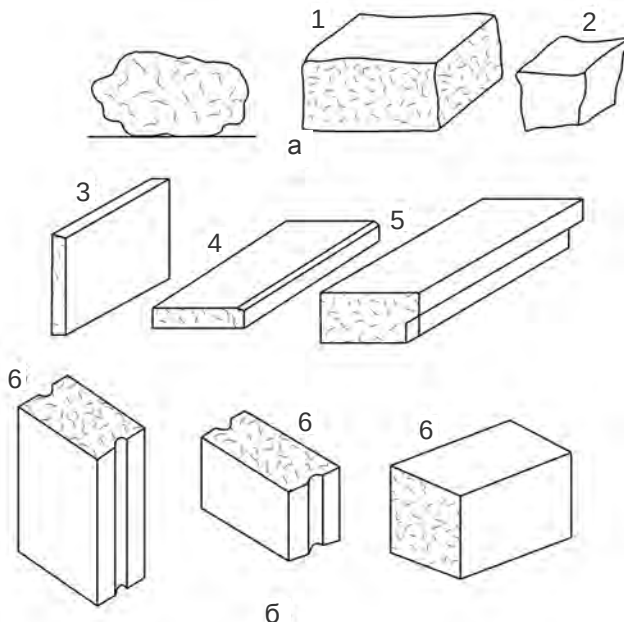


**Рис. 6.14.** Виды каменных материалов и изделий, используемых в строительстве: а – бутовый камень (бут); б – изделия.

1 – стеновой камень; 2 – брусчатка; 3 – облицовочная плита;  
4 – подоконная плита; 5 – цельная ступень; 6 – стеновые  
каменные блоки

Горные породы, применяемые для получения блоков(полуфабрикатов), плит и других облицовочных изделий, должны иметь предел прочности на сжатие не менее 5 МПа, морозостойкость – не менее 15 циклов. В зависимости от объема блоки делят на четыре группы. Объем блоков первой группы - свыше 5 м<sup>3</sup>, второй – 3-5 м<sup>3</sup>, третьей – 0,7-3 м<sup>3</sup>, четвертой – 0,1-0,7 м<sup>3</sup>. Для блоков нормируют размеры, качественные показатели их поверхности, учитывая при этом вид горной породы.

Архитектурные достоинства изделий из природного камня в значительной мере определяются их фактурой. Основными видами фактур облицовочных изделий являются фактуры типа “скала”,

## 6. Природные каменные материалы

бугристая, рифленая, точечная, бороздчатая, шлифованная, лощеная, полированная. Они образуются при обработке камня скалыванием, распиливанием, шлифованием, лощением и др.

В качестве облицовочных применяют камни светлой окраски (розовые, красные и серые граниты, белые и цветные мраморы) так и темноокрашенные породы (диориты, базальты, черные мраморы).

Из щебня и песка, полученных при дроблении горных пород изготавливают облицовочные плиты с применением вяжущих веществ, которые в зависимости от способа изготовления подразделяют на три типа:

I – прессованные или формованные;

II – пиленные из искусственно отформованных блоков;

III – склеенные из кусков камня правильной или произвольной формы.

Лицевая поверхность плит может быть мозаичной, брекчиевидной, орнаментной или с песчано-щебеночным декоративным слоем.

Мозаичную лицевую поверхность получают с использованием декоративного щебня, брекчиевидную – из кусков природного камня произвольной формы или из их смеси с декоративным щебнем; орнаментную – из природного камня правильной формы. Поверхность плит с песчано-щебеночным декоративным слоем получают из декоративных щебня и песка и синтетического связующего.

В качестве вяжущих для изготовления плит I и II типов используют рядовой, белый или цветной портландцемент, III типа – синтетические смолы (эпоксидные, полиэфирные и др.).

Физико-механические показатели плит должны соответствовать следующим требованиям:

Прочность при сжатии, МПа, не менее

- бетона для изготовления плит I типа 20

- бетона для плит II типа 30

- подстилающего раствора 15

Прочность при изгибе, МПа, не менее 3

Водопоглощение, %, не более 8

Истираемость плит для полов, г/см<sup>2</sup>, не более 2,2

Морозостойкость бетона для внешней облицовки, не менее F50

Благодаря высокой долговечности облицовок из природного камня затраты на их эксплуатацию в 5-8 раз меньше, чем при отделке зданий красками, цветными растворами и бетонами.

В качестве *стеновых материалов* (рис. 6.15) применяют пиленные штучные камни и крупные блоки с основными размерами, приведенными в табл.6.5. Удельные капитальные вложения на их добычу примерно в 1,5 раза ниже, чем на изготовление керамического кирпича. Особенно распространено применение природного камня для кладки стен в ряде южных районов. Для их получения используют легкие, пористые горные породы с пределом прочности на сжатие от 0,4 до 50 МПа и морозостойкостью не менее 15 циклов. Минимальные значения коэффициента размягчения стеновых камней и блоков – 0,6, водопоглощение для туфов и опоки – до 50%, известняков и других пород – 30%.

Таблица 6.5

Основные размеры стеновых камней и блоков, мм

|        | Камни    | Блоки                  |
|--------|----------|------------------------|
| Длина  | 390; 490 | 400; 500               |
| Ширина | 190; 240 | 820; 1000              |
| Высота | 188; 288 | 2360; 2520; 2860; 3020 |



**Рис. 6.15.** Стеновой камень из известняка-ракушечника

По назначению стеновые камни подразделяются на лицевые и рядовые. Последние используют для кладки стен с последующим

## 6. Природные каменные материалы

---

оштукатуриванием. Лицевые камни должны иметь марку по прочности на сжатие не менее 2,5 МПа, коэффициент размягчения не менее 0,7.

Стеновые изделия из природного камня ряда месторождений обладают красивой фактурой, легко поддаются обработке.

Эффективно применение крупных составных блоков высотой “на этаж”, изготовляемых из 6-8 обычных блоков, зазоры между которыми заполняют цементным раствором. Перспективными изделиями из природного камня являются крупные цельнопиленные панели и панели, склеенные из отдельных элементов полимерами.

**Дорожно-строительные изделия** – изделия в виде брусчатки, колотого, булыжного и бордюрного камня, тротуарных плит, изготавливаемые механической обработкой горных пород (рис. 6.14). Исходным сырьем для дорожно-строительных изделий являются горные породы с прочностью не менее 60 МПа, морозостойкостью не менее 25 циклов, коэффициентом размягчения – 0,6-0,9, водопоглощением – 1-4%, сопротивлением удару – 15 КПа.

Брусчатый камень (брусчатка) – колотые или тесаные бруски камня, имеющие форму усеченной пирамиды с параллельными прямоугольными основаниями. Брусчатку изготавливают из морозостойких, хорошо обрабатываемых пород, имеющих прочность на сжатие не ниже 100 МПа. По высоте брусчатка бывает: низкой – 100, средней – 110-130 и высокой – 140-160 мм. Ширина брусчатки – 120-150 мм, длина – 150-250 мм. Брусчатку применяют для мощения городских улиц, площадей и заполнения трамвайного полотна.

Колотый и булыжный камень в основном используют для устройства верхних покрытий дорог 4-й и 5-й категорий и оснований дорог 1-3 категорий. Кроме того, его применяют для укрепления откосов земляных сооружений и берегоукрепительных работ.

Бортовой камень отделяет проезжую часть дорог от тротуара. Изготавливается в виде изделий, имеющих форму прямоугольных параллелепипедов длиной 1000-2000 мм, высотой 300-400 мм и шириной 100-200 мм из плотных изверженных пород для которых характерны высокая прочность морозо- и износостойкость.

Тротуарные плиты изготавливают из слоистых горных пород. Они имеют форму прямоугольных или квадратных плит со сто-

ронами 200-800 мм и ровной лицевой поверхностью (толщина 40-150 мм).

*Бутовый камень* – строительный материал, состоящий из кусков горной породы неправильной формы размером 70-1000 мм.

Его применяют для кладки (рис. 6.16) фундаментов, подземных частей зданий, стен нежилых, вспомогательных и производственных зданий, для укрепления земляных откосов, в дорожном строительстве, а также в гидротехническом в качестве заполнителя для бутобетона. Бутовый камень подразделяют на постелистый (с одной небугристой гранью) и плитняковый (с двумя приблизительно параллельными гранями). Разновидностью бутового является булыжный камень, имеющий окатанную форму.

Прочность бутового камня оценивается пределом прочности исходной горной породы на сжатие в насыщенном водой состоянии. Марки бутового камня по прочности: М100, М200, М300, М400,



**Рис. 6.16.** Бутовая кладка

М600, М800, М1000, М1200, М1400. Камень из метаморфических пород (гнейсы, кварциты и др.) должен иметь марку не ниже М400, а из *магматических* (граниты, габбро и др.) – не ниже М600. Марки бутового камня по морозостойкости F15 – F300. В партии бутового камня допускается не более 15% кусков с размерами, отличными от предельных. Содержание глины в комьях не должно превышать 2% по массе.

В гидротехническом строительстве бутовый камень применяется для возведения набросных плотин. Состав камня по крупности назначается из условия получения минимальной пористости с учетом особенностей плотин.

К материалам специального назначения можно отнести *электроизоляционные материалы* из горных пород, используемые в виде досок, плит, панелей и других изделий. Эти материалы сравнительно дешевы и используются при электромонтажных работах, особенно в тех районах, где они могут быть получены из легко доступного местного сырья. С этой целью применяют, например, мрамор,

## 6. Природные каменные материалы

сланцы, тальк, талькохлорит и другие горные породы. Удельное объемное сопротивление их  $10^7$ - $10^{11}$  Ом·см, диэлектрическая проницаемость 5-10, электрическая прочность 1-10 кВ/мм.

Из природных минеральных электроизоляционных материалов важными являются слюды – минералы из группы водных алюмосиликатов: мусковит и флогопит. Из отдельных пластинок слюды изготавливают с помощью полимерных связующих листовые и рулонные материалы, применяемые благодаря высокой электрической и механической прочности, температур- и влагостойкости для изоляции электрических машин высокого напряжения.

**Производство природных каменных материалов.** Технология природных каменных материалов определяется их видом, необходимыми качественными показателями, свойствами горной породы, условиями ее залегания. Месторождение, подготовленное к разработке горных пород, называется *карьером*. Подготовка месторождения начинается с удаления верхних вскрышных пород и обнажения полезного ископаемого. Карьеры разрабатывают одним или несколькими уступами, высота которых обычно не превышает 20 м.

Наиболее массовая продукция – дробленый камень из скальных пород – производится с помощью буровзрывных работ. Они включают бурение шпуров (диаметром до 75 мм и глубиной до 5 м или скважин диаметром до 300 мм и глубиной более 5 м), расположенных вдоль фронта уступа, размещение в них взрывчатых веществ (аммонита, аммиачной селитры, аммонала и др.) и отделение с помощью взрыва кусков породы, поступающих на дробление.

Дробильно-сортировочные заводы и установки (рис. 6.17) осуществляют одно-, двух- или многоступенчатое дробление исходного сырья. Многоступенчатое дробление позволяет получать как крупные, так и мелкие фракции щебня и является наиболее распространенным. При одноступенчатом дроблении не представляется возможным обеспечить высокую степень измельчения, т.е. отношение размеров кусков до и после дробления. Одноступенчатая схема применяется обычно на предприятиях малой мощности при наибольшем размере кусков 400-450 мм.

По способу измельчения материала дробильное оборудование бывает с периодическим (щековые, конусные дробилки) и непрерывным нажатием дробящих поверхностей (дробилки валковые и ударного действия – молотковые и роторные).



Дробленый материал сортируется по фракциям механическим, гидравлическим и воздушным способами. При наиболее распространенном механическом способе сортировка камня производится с помощью грохотов. На предприятиях нерудных строительных материалов наиболее распространены вибрационные грохоты, в которых устанавливают одно или два проволочных сита.

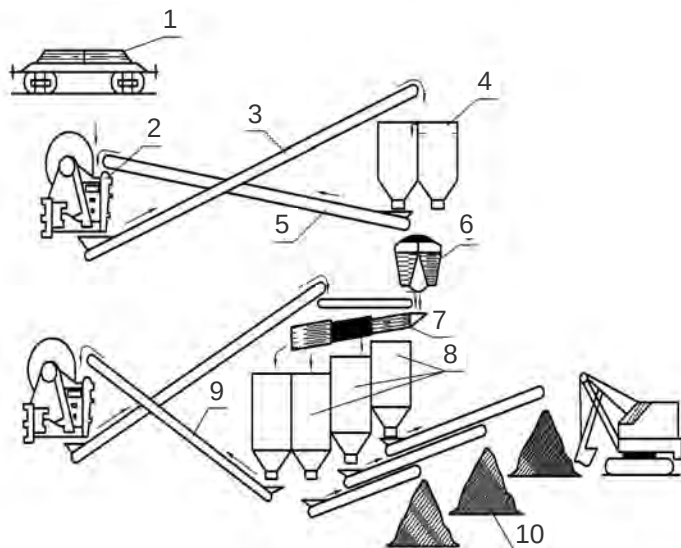


**Рис. 6.17.** Схема дробильно-сортировочного завода для получения щебня: 1 – камень; 2 – щековая дробилка; 3, 5, 9 – конвейеры; 4, 7 – грохоты; 6 – конусная дробилка; 8 – бункер; 10 – склады фракционированного щебня

Дробление камня возможно по открытому или закрытому циклу. При открытом цикле материал однократно проходит через дробилку, поступает на сортировку, а затем на склад готовой продукции. При замкнутом цикле камень, не прошедший через верхнее сито, вторично поступает на дробление, что позволяет достичь большей производительности дробилок, регулировать выход и крупность готовых продуктов.

Пылеватые и глинистые примеси, загрязняющие дробленый камень, удаляют промывкой, для чего используют лопастные, барабанные или вибрационные промывочные машины.

Наряду с промывкой применяют специальные методы обогащения нерудных материалов. При переработке на щебень низкокачественного сырья используют, в частности, способ избирательного дробления, основанный на более интенсивном разрушении кусков слабых пород. Гравитационное обогащение основано на зависимости между прочностью и плотностью породы. Неоднородные по плотности зерна материала разделяют в специальных отсадочных машинах в попеременно восходящих и нисходящих струях воды или в тяжелых средах (водных суспензиях магнетита или ферросилиция), плотность которых имеет промежуточное значение между плотностями разделяемых фракций.

Рыхлые породы (гравий, песок, гравийно-песчаные смеси) добывают открытым способом, преимущественно с помощью одно- или многоковшовых экскаваторов. Наряду с сухим способом на песчано-гравийных карьерах широкое применение получила гидромеханизированная добыча. Разрабатываемая этим способом порода при динамическом воздействии воды отделяется, рыхлится и транспортируется землесосными установками в виде пульпы на склад или на переработку.

Штучный камень из легкообрабатываемых горных пород – мрамора, известняка, туфа – получают с помощью камнерезных машин. Рабочими органами этих машин служат горизонтальные и вертикальные дисковые пилы, установленные на тележке, передвигаемой в карьере по рельсам вдоль забоя. Камнерезные машины позволяют механизировать как резку камня, так и вспомогательные операции по его штабелированию и транспортированию из забоя.

Кроме машин с дисковыми режущими инструментами применяют буровые машины с цепными пилами. Производительность машин на породах средней твердости увеличивается в 4-5 раз при использовании алмазных режущих насадок.

Облицовочные изделия из твердых пород получают отделением от массива крупных монолитов, разделяемых на блоки и плиты. Для отделения монолитов применяют буроклиновой, буровзрывной способы, ударные врубовые машины. Для кварцесодержащих пород группы гранита применим термический способ. Он основан на разрушающем действии внутренних напряжений, возникающих при термических деформациях минералов под влиянием высокой тем-

пературы. Распиловка блоков на плиты или фасонные детали производится с помощью рамных твердосплавных или алмазных пил.

## 6.4. Долговечность природных каменных материалов

Долговечность оценивается длительностью службы камня (в годах) до появления признаков разрушения. В зависимости от величины этих показателей природные каменные материалы классифицируют на четыре группы долговечности (табл. 6.6).

Разрушение камня в процессе эксплуатации может проявляться в разнообразных формах: шелушение поверхности, появление трещин, расслаивание, выкрашивание отдельных частиц и фрагментов изделий, появление пластических деформаций.

Таблица 6.6

Классификация горных пород по долговечности

| Категории долговечности  | Наименование горных пород                          | Долговечность в годах |                  |
|--------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------|------------------|
|                          |                                                    | начало разрушения     | конец разрушения |
| Весьма долговечные       | Кварциты, мелкозернистые граниты                   | 650                   | —                |
| Долговечные              | Крупнозернистые граниты, габбро, лабрадориты и др. | 220...350             | 1500             |
| Относительно долговечные | Белые мраморы, плотные известняки и доломиты       | 75...150              | 1200             |
| Недолговечные            | Гипсовые камни, ангидриты, пористые известняки     | 20...75               | 100...600        |

Одной из главных причин, сокращающих срок службы камня, является климатическое воздействие (так называемое *физическое выветривание*): перемещение и испарение влаги с растворенными в ней веществами и резкие температурные колебания с переходами через нулевую температуру. Негативное воздействие на водонасыщенный камень оказывает не столько значение температуры после замерзания, сколько частота перехода через 0°C,

## 6. Природные каменные материалы

т.е. чередование циклов замерзания и оттаивания. Такое воздействие на камень приводит к развитию в нем трещин, разрыву перемычек между отдельными порами, ослаблению связи между кристаллами, снижению механической прочности. При этом основной причиной разрушения является воздействие замерзающей воды; последняя, расширяясь, оказывает сильное давление на стенки пор. В результате этого участки камня в замкнутом пространстве испытывают большие механические напряжения, которые могут привести к его разрушению.

Хотя температурный коэффициент линейного расширения у природного камня относительно невысок, он может разрушаться вследствие того, что кристаллы различных порообразующих минералов имеют различные коэффициенты линейного термического расширения. В результате порода под действием резких температурных перепадов может покрываться сеткой мелких трещин, способствующих дальнейшему разрушению.

Значительное отрицательное влияние на долговечность камня оказывают механические факторы, среди которых можно выделить ударные воздействия, сжимающие и изгибающие нагрузки, истирание, воздействие абразивных частиц.

Важными являются также химические факторы, которые в ряде случаев могут резко сократить срок службы изделий из природного камня (т.н. *химическое выветривание*). Так, при недостаточной гидроизоляции каменных сооружений возможен подсос в камень грунтовых вод с последующим отложением солей, приводящим к возникновению выцветов и высолов, а иногда и к разрушению недостаточно стойкого камня. К химическим факторам, вредно влияющим на долговечность камня, относится также значительное содержание в атмосфере оксида  $SO_3$ , что приводит при увлажнении к образованию в камне сернокислых солей, расширяющихся при гидратации.

Процесс постепенного разрушения каменных материалов в конструкциях зданий и сооружений можно предотвратить или затормозить с помощью различных конструктивных и химических методов защиты, способствующих снижению воздействия перечисленных выше факторов.

*Конструктивные методы* выражаются в устройстве гладких или полированных поверхностей материалов, не способных за-

держивать дождевые и талые воды и пропускать агрессивные среды внутрь каменного материала.

*Химические методы* защиты предусматривают консервацию камня путем последовательной пропитки его верхнего слоя веществами, вследствие реакции между которыми образуются нерастворимые вещества, колюматирующие поры и микротрещины. К таким методам относят силикатизацию, флюатирование а также модификацию полимерными соединениями.

*Силикатизация* заключается в пропитке верхнего слоя камня раствором жидкого стекла, а затем – раствором хлористого кальция. Образующий в результате реакции силикат кальция  $\text{CaO} \cdot n\text{SiO}_2$  является практически нерастворимым соединением.

Процесс *флюатирования* состоит, в обработке известняков и других пород, содержащих кальцит, водными растворами кремнефтористых солей. Эти соли (флюаты) вступают в химические соединения с растворимыми компонентами камня с образованием фтористых солей Ca и Mg и кремнезема, нерастворимых в воде, которые уплотняют поверхность камня и делают ее недоступной для агрессивных сред. Так, например, при обработке известняковых пород кремнефтористым магнием образуются кремнезем и фтористые соли:



Флюатирование можно применять и для некарбонатных (кислых) пород. С этой целью их предварительно пропитывают раствором соли, которая впоследствии образует с флюатом защитный слой из нерастворимых в воде соединений.

Возможно использование также водных растворов и эмульсий, полимерных веществ и водополимерных дисперсий. Так, например, для гидрофобизации поверхности и пор камня применяют кремнийорганические жидкости (ГКЖ) а также водный раствор мочевиноформальдегидной смолы. Надежная обработка создается некоторыми мономерами с последующей их полимеризацией при термокаталитической обработке. Данный метод модификации наиболее эффективен для обработки пористых горных пород.

Применяемые совместно конструктивные и химические мероприятия приводят к существенному увеличению долговечности природных каменных материалов в различных конструкциях.

## 7. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

К керамическим относятся материалы, получаемые спеканием глин, их смесей с минеральными добавками, оксидов металлов и других тугоплавких соединений. Современная керамика – это обширный класс неорганических материалов, изделия из которых находят широкое применение в строительстве и во многих отраслях техники, включая атомную, ракетно-космическую промышленность, радиоэлектронику и др.

Строительная керамика относится в основном к традиционной или силикатной керамике, известной как промышленный продукт более 5 тыс. лет до н.э. Строительные керамические изделия изготавливают в основном из глин. Само слово “керамика” происходит от греческого “керамейя”, что означало в древнее время искусство изготавливать изделия из глины.

### 7.1. Составы керамических масс

Основными исходными материалами для получения керамики являются *глины* – осадочные породы, состоящие из глинистых минералов и примесей. К главным глинистым минералам относятся минералы группы каолинита, монтмориллонита и гидрослюд. Все глинистые минералы относятся к водным алюмосиликатам с характерной для них слоистой структурой. Так, кристаллическая решетка *каолинита* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) складывается из двухслойных плоских пакетов, каждый из которых включает слой кремнекислородных тетраэдров и слой, образованный атомами алюминия, кислорода и гидроксильной группы (рис. 7.1).

Размер частиц каолинита от 1 до 3 мкм. *Монтмориллонит* ( $\text{MgO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) обладает способностью интенсивно поглощать большое количество воды, прочно удерживать ее и трудно отдавать при сушке. В результате сильного набухания при увлажнении объем монтмориллонита может увеличиваться до 16 раз. Размеры монтмориллонита значительно меньше 1 мкм. *Гидрослюды* ( $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{MgO} \cdot 4\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) – продукты многолетней гидратации слюд. По интенсивности связи с водой занимают промежуточное положение между каолинитом и монтмориллонитом. Харак-

терная особенность отдельных катионов к изоморфным замещениям. Так  $\text{Si}^{4+}$  может заменяться  $\text{Al}^{+3}$ , а последний –  $\text{Mg}^{2+}$ . Размер частиц гидрослюд также около 1 мкм.

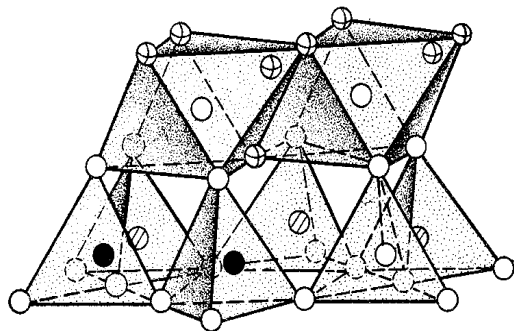


**Рис. 7.1.** Схематическая структура каолинита. Кругки указывают центры тяжести отдельных ионов:

○ – O; ⊙ – OH; ● – Si; ⊘ – Al (Mg)

Каолинит кристаллизуется в виде гексагональных пластинок (рис. 7.2), монтмориллонит и гидрослюды имеет менее четкую кристаллизацию.

Основные примеси в глинах представлены кварцем, карбонатами, железистыми соединениями, полевыми шпатами, органическими включениями.

В природе глины встречаются чаще как полиминеральные образования, включающие два-три глинистых минерала. Из глин, приближающихся к мономинеральным, для получения керамических материалов применяют каолины.

Ниже приведен средний химический состав глин (%):  $\text{SiO}_2$  – 58,10;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 15,40;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 4,02;  $\text{FeO}$  – 2,45;  $\text{MgO}$  – 2,44;  $\text{CaO}$  – 3,11;  $\text{K}_2\text{O}$  – 3,24;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 1,30;  $\text{H}_2\text{O}$  – 5,00;  $\text{CO}_2$  – 2,63. В количестве меньше одного процента входят примеси оксидов титана, серы, фосфора и др.

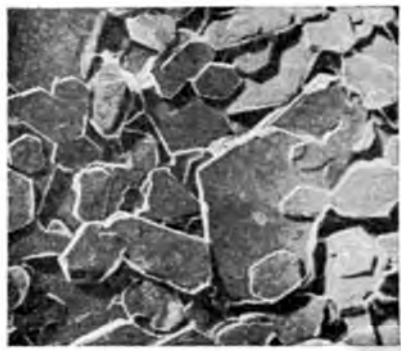


**Рис. 7.2.** Электронная микрофотография каолина (×17200)

Глины классифицируют по многим признакам. В табл. 7.1 приведена классификация глини-

стого сырья, применяемого для получения керамических строительных материалов по наиболее характерным признакам.

## Классификация глин для получения строительной керамики

| № | Классификационный признак                                | Величина                                              |                                             | Виды глин                                                                    |
|---|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Содержание глинистого вещества (менее 0,005 мм)          | Свыше 60%<br>30...60<br>20...30<br>5...10             |                                             | тяжелые глины<br>глины<br>суглинки<br>супесь                                 |
| 2 | Содержание дисперсных фракций (менее 10 и 1 мкм)         | <10 мкм<br>1) более 85%<br>2) 40...85<br>3) менее 40% | <1 мкм<br>более 60%<br>20...60<br>менее 20% | 1) тонкодисперсные<br>2) дисперсные<br>3) грубодисперсные                    |
| 3 | Пластичность (число пластичности)                        | >25<br>15...25<br>15...7<br>>7                        |                                             | высокопластичные<br>среднепластичные<br>умереннопластичные<br>малопластичные |
| 4 | Спекаемость (водопоглощение по массе, %)                 | <2<br>от 2 до 5<br>>5                                 |                                             | сильноспекающиеся<br>среднеспекающиеся<br>неспекающиеся                      |
| 5 | Содержание $Al_2O_3 + TiO_2$ , % в прокаленном состоянии | более 40%<br>30...40%<br>15...30%<br>менее 15%        |                                             | высокоосновные<br>основные<br>полукислые<br>кислые                           |
| 6 | Огнеупорность                                            | >1580°C<br>1350...1580°C<br><1350°C                   |                                             | огнеупорные<br>тугоплавкие<br>легкоплавкие                                   |

Возможность применения глин для получения тех или иных керамических изделий определяется их химическим и гранулометрическим составом (рис. 7.3 и 7.4).

*Керамико-технологические свойства* глин могут быть объединены в четыре группы – водные, механические, сушильные и термические.



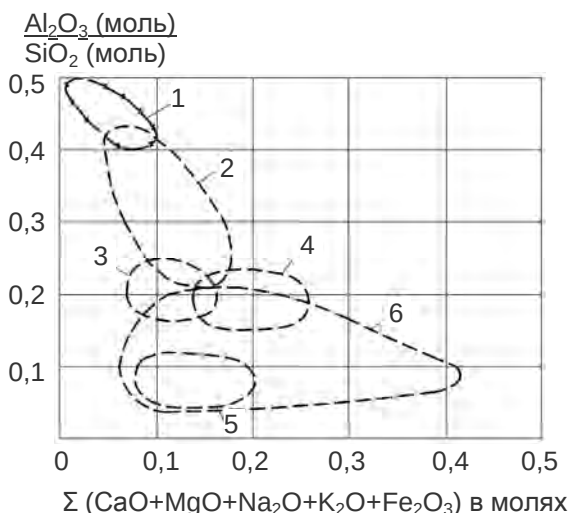


**Рис. 7.3.** Промышленное назначение глин в зависимости от их химического состава (по Августинику): 1 – огнеупорные шамотные изделия; 2 – плитки для полов, канализационные трубы, кислотоупорные изделия и каменный товар; 3 – гончарные и терракотовые изделия; 4 – черепица; 5 – дорожный клинкер; 6 – кирпич

Глины относятся к гидрофильным коллоидам и содержат большое количество воды, значительная часть которой находится в виде тонких прослоек, разделяющих набухшие твердые частицы. Способность глин удерживать определенное количество воды называется их *влагоемкостью*. В системе глина-вода зерна глинистых минералов, имея отрицательные заряды, создают силовое поле. Дипольные молекулы воды образуют в непосредственной близости от глинистых частиц полимолекулярный адсорбированный, а затем по мере удаления от их поверхности диффузный слой относительно слабосвязанной воды. В диффузный слой часть воды проникает также путем осмотического всасывания, а в порах она может удерживаться дополнительно капиллярными силами.

*Гранулометрический состав* глин зависит от содержания в них глинистых, пылеватых и песчаных фракций. С увеличением дисперсности влагоемкость глин возрастает. Наибольшее значение она имеет у монтмориллонитовых, наименьшее – у каолиновых глин.

В результате проникновения дисперсионной среды (воды) в частицы дисперсной фазы (глинистые минералы) увеличивается объем системы и глина набухает. Способность глин к набуханию определяется возможным давлением набухания ( $P_n$ ). По величине давления набухания глинистые породы подразделяются на ненабухающие ( $P_n < 0,025$  МПа), слабонабухающие ( $P_n = 0,025-0,1$  МПа), средненабухающие ( $P_n = 0,1-0,25$  МПа) и сильнонабухающие ( $P_n > 0,25$  МПа). Наибольшим набуханием обладают породы, в составе которых имеются глинистые минералы типа монтмориллонита, наименьшим – каолинитсодержащие глины.

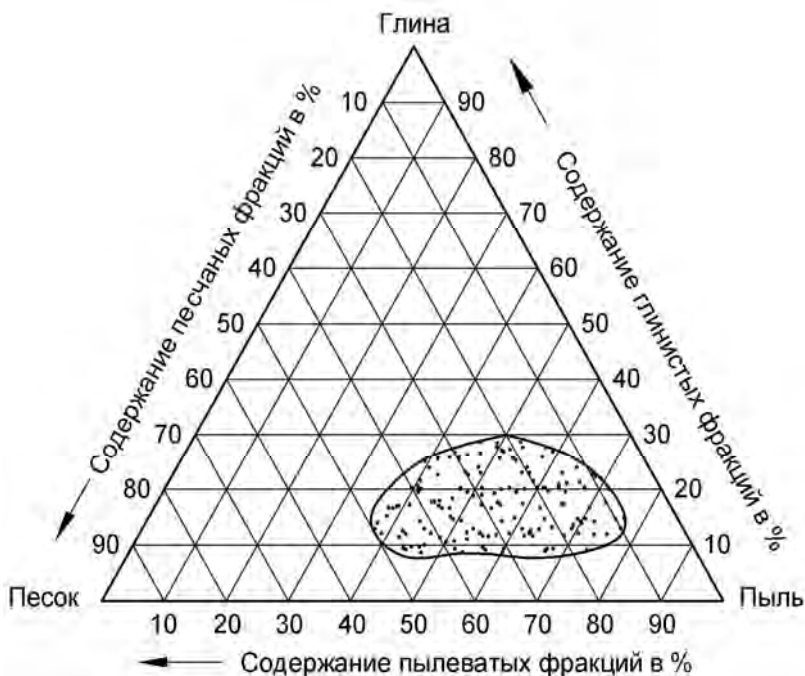


**Рис. 7.4.** Диаграмма гранулометрического состава глин, пригодных для изготовления обыкновенного керамического кирпича

При приготовлении пластичного глиняного теста или глиняной суспензии – шликера важное значение имеет *размокаемость* глин – способность их к диспергированию в воде. Первой стадией размо-

кания является набухание глинистых частиц, по мере возрастания толщины водные оболочки экранируют межмолекулярные силы сцепления. До некоторой толщины водные оболочки на частицах удерживаются капиллярными силами, которые практически исчезают по мере заполнения пор. При полном размокании твердые частицы свободно перемещаются в воде, находясь в ней во взвешенном состоянии. Интенсивность размокания возрастает при подогреве воды и перемешивании ее с глинами.

Для коагуляционных структур, образуемых глинами с водой, характерна способность к тиксотропии, что учитывается в технологии подготовки керамических масс.

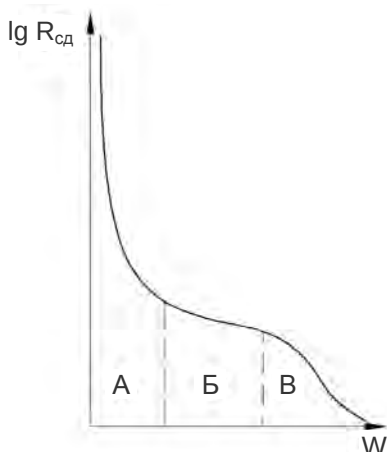


**Рис. 7.5.** Изменение деформативных свойств глины в зависимости от ее влажности.

Области состояния:

А – хрупкое; Б – пластическое;  
В – вязкотекучее

Основным механическим свойством глин, проявляемым при воздействии на них внешних усилий, является *пластичность* – способность без разрыва сплошности приобретать заданную форму и сохранять ее после прекращения действия усилий. Пластическое состояние материала является промежуточным между хрупким и вязкотекучим (рис. 7.5). В этой области прочность глиняного теста, обусловленная силами межмолекулярного притяжения и капиллярного давления, достаточна для сохранения образцом формы, но недостаточна для сопротивления скольжению частиц относительно друг друга при воздействии на них внешних усилий. Пластичности

глин способствует ультравысокая дисперсность глинистых минералов.

По М.П. Воларовичу показатель пластичности вязких жидкостей можно найти из выражения:

$$\varphi = \frac{R_{сд}}{\eta}, \quad (7.1)$$

где  $R_{сд}$  – пластическая прочность (предел прочности при сдвиге);  $\eta$  – структурная вязкость.

Технологическим показателем пластичности глин является число пластичности Пл:

$$\text{Пл} = \omega_t - \omega_p, \quad (7.2)$$

где  $\omega_t$  – влажность предела текучести, %;  $\omega_p$  – влажность предела раскатывания образца-жгута из глины, %.

Пластичность глин определяется минералогическим составом и содержанием глинистых минералов, дисперсностью.

Изменения, происходящие с глиной при сушке, характеризуются величиной т.н. воздушной усадки образцов, чувствительностью к сушке, влагопроводными свойствами.

*Усадочные деформации* глины при сушке обусловлены силами капиллярного давления. Давление возникает при удалении воды из капилляров, когда нарушается силовое равновесие между капиллярными и гравитационными силами.

Количественной мерой усадочных деформаций при сушке глин является величина относительной усадки:

$$y = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \cdot 100\%, \quad (7.3)$$

где  $l_0$  и  $l_1$  – соответственно начальная и конечная после высушивания длина образца.

Для большинства глин относительная воздушная усадка находится в интервале 2-8%.

Усадка увеличивается с ростом влагоемкости глин, она зависит также от режима сушки, достигая большего значения в условиях медленного испарения влаги.

Неодинаковая величина усадки по сечению и поверхности глиняных изделий при сушке вызывает появление растягивающих напряжений и трещин. Показателем трещиностойкости глин является коэффициент чувствительности их к сушке:

$$K_t = \frac{V}{V_0 \left( \frac{m_0 - m}{V_0 - V} - 1 \right)}, \quad (7.4)$$

где  $V_0$  и  $m_0$  – соответственно, объем и масса влажного образца непосредственно после формования;  $V$  и  $m$  – то же, образца, высушенного при 16-20°C.

При  $K_t < 1$  глины считают малочувствительными,  $K_t = 1-1,5$  – среднечувствительными и  $K_t > 1,5$  – высокочувствительными к сушке.

Наряду с усадочными деформациями трещиностойкость глиняных изделий при сушке определяется прочностью, растяжимостью и влагопроводящими свойствами глины.

Корректирование необходимых свойств керамических масс достигается использованием различных добавочных материалов. Например, в сырьевые массы, используемые в производстве изделий стеновой керамики, кроме основного сырья – глин, применяют добавки:

- улучшающие формовочные свойства массы (высокопластичная глина, поверхностно-активные вещества);
- улучшающие сушильные свойства (шамот, песок, дегидрированная глина, опилки);
- улучшающие условия обжига (золы ТЭС, шлаки, уголь);
- повышающие прочность и морозостойкость (бой стекла, пиритные огарки, железная руда);
- специального назначения – улучшающие цвет изделий, предотвращающие выцветы, нейтрализующие вредное влияние природных включений, имеющихся в глинах (красители, жидкое стекло, хлористый кальций и др.).

Составы керамических масс определяются требуемой структурой изделий и их свойствами. При получении, например, фаянсовых и фарфоровых строительных изделий наряду с глинами и каолином обязательно применяют плавни – добавки, образующие с глиной при обжиге легкоплавкие соединения и способствующие повышению степени спекания (полевошпат, пегматит, нефелиновый сиенит и др.). Некоторые составы масс для производства санитарно-строительных изделий приведены в табл. 7.2.

Огнеупорные глины и каолины являются основным сырьем для получения наиболее распространенных огнеупоров – шамотных и полукислых изделий. Для производства высокоглиноземистых огнеупоров применяют как основной сырьевой материал корунд, магнезитовых – магнезит, тальковых – тальк и т.д. При получении технической керамики основными исходными компонентами часто служат оксиды ряда металлов.

Таблица 7.2

Некоторые составы масс для производства  
санитарно-строительных изделий

| Материалы                      | Содержание в % для масс |                |            |
|--------------------------------|-------------------------|----------------|------------|
|                                | Фаянсовые               | Полуфарфоровые | Фарфоровые |
| Глина огнеупорная              | 25                      | 17...20        | 13...23    |
| Каолин                         | 30                      | 25...30        | 27...30    |
| Пегматит                       | -                       | 15...20        | -          |
| Полевой шпат                   | -                       | -              | 18...20    |
| Песок кварцевый                | 33                      | 24...26        | 22...27    |
| Доломит                        | -                       | 1              | -          |
| Бой готовой продукции          | 12                      | 4...6          | 8...12     |
| Сверх 100% сернокислый кобальт | 0,025                   | 0,025          | -          |
| Сода                           | 0,2                     | 0,12           | -          |
| Жидкое стекло                  | 0,1...0,15              | 0,2            | -          |

\* Количество добавок указано сверх 100%.

## 7.2. Процессы обжига и спекания

Керамические материалы формируются в результате высокотемпературных процессов, идущих при обжиге сырьевых масс, обладающих способностью спекаться. Под *спекаемостью* в общем случае понимают способность веществ при обжиге уплотняться с образованием твердых камнеподобных тел. Наряду с кристаллическими фазами при спекании обычно происходит частичное плавление, что приводит к образованию стекловидной фазы. Соотношение кристаллической и стекловидной фаз во многом определяет физико-механические свойства материалов.

Спекание осуществляется на воздухе или в защитной газовой среде при температуре, как правило, не ниже 0,6-0,7 температуры плавления материала. Спеканию предшествует ряд сложных физико-химических процессов в сырьевых массах. Так, при обжиге глинистой керамики на основе каолинистых глин при 100-200°C удаляется свободная и гигроскопическая вода, при 600-800°C удаляется

основная масса химически связанной или гидратной воды и образуется *метакаолин* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Термодинамически и экспериментально подтвержденная к настоящему времени гипотеза об образовании после дегидратации глинистых минералов метакаолина – силиката состава  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  вместо свободных оксидов была выдвинута В.И.Вернадским. Метакаолин имеет скрытокристаллическую структуру и высокую реакционную способность. При 850-1000°C уже возможно прямое обра-



**Рис. 7.6.** Микрофотография кристаллов муллита в шамотном огнеупоре (×500)

зование *муллита* (минерала из класса силикатов, химический состав непостоянен – от  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  до  $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ) (рис.7.6), который интенсивно образуется при 950-1200°C. Кроме муллита в каолиновой керамике образуется *кристаллит*, в монтмориллонитовой – шпинель и стекло.

Изделия грубой стеновой керамики обжигаются при максимальной температуре 950-1050°C. Заметное образование расплава происходит при температурах 850-900°C и более высоких. С физической стороны действие расплава

проявляется в усадке изделий, снижении их пористости. Такая керамика характеризуется грубозернистой структурой, часто высокой пористостью (7...20%). Клинкерный кирпич и плитку обжигают при более высоких температурах – не ниже 1100-1200°C. Плотность таких изделий высока: водопоглощение клинкерного кирпича составляет 0,9-5%, плитки для полов – до 4%.

Обжиг изделий тонкой керамики (облицовочные плитки, санитарно-технические изделия) по традиционной технологии проводится при температурах до 1250-1280°C с образованием плотно спекшейся массы (водопоглощение до 4%). Для обжига на скоростных конвейерах облицовочных плиток при температуре до 1100°C необходимо использовать соответствующие составы сырьевых

шихт. Специальные виды твердого фарфора обжигают при температурах до 1450°C. В результате обжига до спекания структура тонкой керамики характеризуется оплавлением поверхностных зон зерен кварца, полевого шпата с образованием зерен муллита; поры такой керамики в основном закрыты, размер их около 10 мкм, количество не превышает 5%. Количество стекломуллитовой фазы составляет 22-28%.

В производстве строительной керамики степень спекания контролируется водопоглощением и спекшимся считают материал, имеющий водопоглощение не ниже 5%. В связи с этим для глин спекаемость определяют как их способность давать без признаков пережога материал с водопоглощением менее 5%. В зависимости от степени спекания глины классифицируют на три группы: сильно-спекающиеся – с водопоглощением керамики не более 2%, средне-спекающиеся – не более 5%, неспекающиеся – более 5%. Глины классифицируют также на три группы и по температуре спекания: низкотемпературного – до 1100°C, среднетемпературного – свыше 1100 до 1300 и высокотемпературного спекания – свыше 1300°C.

Степень спекаемости глины характеризуется температурным интервалом спекания  $\Delta t_{\text{сп}}$ . Для легкоплавких глин:

$$\Delta t_{\text{сп}} = t_{\omega=1\%} - t_{\omega=5\%}, \quad (7.5)$$

огнеупорных глины

$$\Delta t_{\text{сп}} = t_{\text{ог}} - t_{\omega=2\%}, \quad (7.6)$$

где  $t_{\omega=5\%}, t_{\omega=2\%}, t_{\omega=1\%}$  – температуры, при которых керамика приобретает водопоглощение соответственно 5; 2 и 1%,  $t_{\text{ог}}$  – температура огнеупорности глины.

Увеличение интервала спекания положительно влияет на качество материала, обжигаемого в промышленных печах, для которых характерны определенные перепады температур по объему. Способствуют расширению интервала спекания  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , резко его уменьшает  $\text{CaO}$ . Интервал спекаемости глины уменьшается по мере роста их запесоченности. Легкоплавкие глины имеют интервал спекаемости 50-100°C, огнеупорные – до 400°C.

Для некоторых керамических изделий, когда чрезмерно низкое водопоглощение недопустимо (строительный кирпич), температурные границы обжига ограничиваются не интервалом спекания, а т.н. интервалом обжига – диапазоном температур, в котором изделия



приобретают регламентированные показатели свойств. Интервал обжига обычно значительно шире, чем интервал спекания.

Спекание обусловлено преимущественно избыточной свободной поверхностной энергией системы. При уменьшении этой энергии

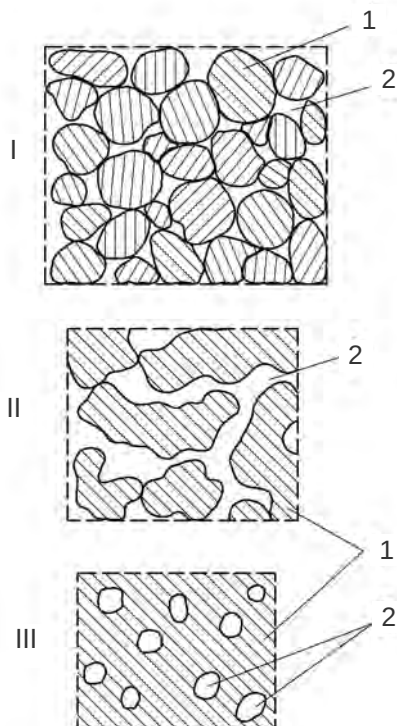


**Рис. 7.7.** Стадии процесса спекания: I – припекание; II – основная стадия; III – образование закрытых пор и их зарастание; 1 – твердая фаза; 2 – поры

соседними частицами; 2 – основная стадия – слияние частиц между собой без образования замкнутых пор; 3 – образование закрытых пор и их зарастание (рис. 7.7). В первой стадии спекания при более низких температурах происходит главным образом поверхностная

возникает капиллярное давление (лапласовские силы), под действием которого образуются контакты между частицами, и уменьшается пористость. В общем случае капиллярное давление обратно пропорционально среднему размеру частиц порошка, поэтому характеристика дисперсности в значительной степени определяет его спекаемость.

Процесс спекания можно активизировать за счет реакций, увеличивающих подвижность атомов (диссоциация, полиморфизм оксидов и т.д.), а также внешнего давления (горячее прессование). В начальной стадии спекания общая пористость изменяется в основном за счет открытых пор, закрытая пористость изменяется значительно меньше. На конечной стадии, когда нет открытых пор, материал уплотняется за счет закрытых пор.

Условно выделяют три стадии спекания: 1 – припекание – образование контактов между

диффузия. По мере повышения температуры роль поверхностной диффузии убывает и возрастает роль объемной диффузии. Диффузионное спекание сопровождается ростом зерен – рекристаллизацией. Чрезмерно большой рост кристаллов ухудшает механические свойства керамики, вызывая увеличение напряжения на границах между кристаллами.

Спекание с участием жидкой фазы или жидкостное спекание является самым распространенным в технологии керамики, оно свойственно всей глиносодержащей керамике. Различают 2 случая жидкостного спекания: 1 – взаимодействие твердой и жидкой фаз отсутствует; 2 – такое взаимодействие происходит. Чаще всего взаимодействие может быть незначительным и не влиять на механизм спекания.

В значительной мере процесс жидкостного спекания определяется вязкостью жидкой фазы. Вязкость расплава не должна быть сильно велика, чтобы тормозить спекание вследствие снижения подвижности, но не должна быть и настолько мала, чтобы происходила деформация изделия под влиянием сил тяжести.

Для ряда керамических материалов, например, фарфора, характерно смешанное спекание с участием процессов в твердой фазе и в присутствии расплава.

### 7.3. Структура и свойства керамических материалов

**Структура керамики.** Важнейшей фазой керамических материалов, влияющей на все основные свойства, являются поры. Содержание их может быть близким к нулю (фарфор) или достигать 90% общего объема материала (пенокерамика). Одним из наиболее простых методов определения пористости является определение т.н. кажущейся или открытой пористости методом водонасыщения. Общая пористость складывается из открытых и закрытых пор и ее для керамики также как и для других материалов можно рассчитать, зная истинную и среднюю плотность.

По мере обжига часть открытых пор превращается в закрытые. При уменьшении пористости керамики примерно до 5% открытые поры практически исчезают, изделия становятся газонепроницаемыми.

Наиболее распространенной структурой керамики является такая структура, когда одна или несколько фаз диспергированы в основной непрерывной массе стекла. Диспергированные кристаллы могут иметь самую разнообразную форму – столбчатую, призматическую, кубическую, сфероидальную и др. Другой обычный вид структуры керамики представлен частицами, состоящими из конгломерата отдельных зерен, сцементированных между собой линзообразными перемычками. Элементами тонкой микроструктуры являются дислокации, другие дефекты решетки кристаллов, поверхности и границы раздела между различными фазами.

Для наиболее распространенной в строительстве керамики из глин фазовый состав определяется диаграммой состояния  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  (рис. 4.4). Эта диаграмма особенно важна для производства полукислых, шамотных огнеупоров, муллитовой и корундовой технической керамики. В системе  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  образуется двойное химическое соединение – муллит, плавящийся без разложения при  $1850^\circ\text{C}$ . Для составов с содержанием от 72 до 77%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  муллит образует твердые растворы с корундом.

При обжиге трехкомпонентных керамических масс, включающих глину, полевого шпат и кварц, являющихся традиционными для фаянсовых и фарфоровых изделий, кристаллы муллита появляются при температуре около  $1000^\circ\text{C}$  и при дальнейшем повышении температуры непрерывно растут. После обжига при температурах выше  $1400^\circ\text{C}$  муллит присутствует в виде призматических кристаллов, длина которых достигает 0,01 мм и более.

Важнейшей составляющей многих керамических масс является кристаллический кремнезем. Во многих глинах он присутствует в виде примеси - кварцевого песка, а в некоторые массы вводится в виде добавок. При нагревании и охлаждении кремнезем претерпевает модификационные превращения: кварц ( $\beta \leftrightarrow \alpha$ )  $\leftrightarrow$  кристобалит ( $\alpha \leftrightarrow \beta$ )  $\leftrightarrow$  тридимит ( $\alpha \leftrightarrow \beta \leftrightarrow \gamma$ ).

Модификационные превращения в пределах одной кристаллической формы происходят почти мгновенно и сопровождаются лишь некоторым смещением атомов в кристаллической решетке, в то время как при переходе в разноименные формы происходят глубокие структурные изменения в кристаллической решетке с разрывом связей. Наличие примесей ускоряет модификационные превращения кремнезема и обеспечивает их большую полноту. Модификаци-

онные превращения кремнезема могут оказывать решающее влияние на прочность и целостность обожженных керамических изделий. Наибольшее значение имеет переход кварца в кристобалит и переход последнего из одной формы в другую.

При изготовлении распространенных стройкерамических изделий - кирпича, черепицы, дренажных и канализационных труб, различного типа плиток используют местные глины, имеющие самый разнообразный состав и структуру. Глинистые минералы в таких глинах обычно находятся в смеси с примесями кварца, полевого шпата, железистых соединений, слюды и др. Примеси в глинах способствуют образованию стекловидной фазы. Структура готовых изделий обычно характеризуется наличием зерен вторичных примесей, вкрапленных в основную массу, состоящую из тонкозернистого муллита и стекла.

Диссоциация карбонатов кальция и магния, присутствующих в качестве примесей во многих глинах, увеличивает пористость обожженных изделий. Если материал до начала интенсивного разложения карбонатов находится уже в достаточно плотном состоянии, то выделяющийся углекислый газ может явиться причиной образования пузырей, вспучивания и других дефектов.

Железистые примеси, присутствующие в значительных количествах в легкоплавких глинах, при обжиге в окислительной среде не оказывают заметного влияния на качество керамики, придавая ей окраску от кремовых до красных тонов. При обжиге в восстановительной среде либо в массах с органическими примесями и добавками окисные соединения при температуре ниже 1000°C восстанавливаются в закисные. При этом образуются легкоплавкие железистые стекла, выделяемые газы могут вызывать вспучивание изделий, если они не обладают достаточной открытой пористостью. Примеси железа в фарфоровых и фаянсовых массах способствуют появлению на изделиях черных пятен ("мушка").

**Свойства керамики.** Для большинства керамических материалов справедлив закон Гука (рис. 7.8):

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (7.7)$$

где  $\sigma$  – величина растягивающего напряжения;  $E$  – модуль Юнга;  $\varepsilon$  – относительное удлинение.

Модуль Юнга или модуль упругости характеризует силу химической связи структурных элементов в кристаллической решетке.

Деформативность гетерогенных материалов кроме модуля Юнга характеризуют еще модулем деформации ( $E_d$ ).

Отношение модуля Юнга  $E$  к модулю деформации  $E_d$  является одним из показателей однородности структуры.

Наряду с природой керамики на ее модуль упругости влияет пористость. По Кнудсену для пористого материала:

$$E_n = E_0 \exp(-a\Pi), \quad (7.8)$$

где  $E_n$  и  $E_0$  – модуль упругости соответственно пористого и беспористого материала,  $\Pi$  – пористость,  $a$  – коэффициент, зависящий от структурных особенностей.

Модуль упругости может достигать для конструкционной керамики  $1...4 \cdot 10^5$  МПа.

Наряду с модулем упругости деформативные свойства керамики характеризуются коэффициентами Пуассона  $\mu$  и сдвига  $\varphi$ :

$$\mu = \frac{\Delta d / d}{\Delta l / l}, \quad (7.9)$$

$$\varphi = \tau_c / \varepsilon_c, \quad (7.10)$$

где  $\Delta d / d$  – относительное изменение толщины образца при одноосном сжатии или растяжении;  $\Delta l / l$  – относительное изменение длины;  $\tau_c$  – напряжение сдвига;  $\varepsilon_c$  – относительная деформация сдвига.

Модуль упругости, коэффициенты Пуассона и сдвига связаны соотношением:

$$\mu = \frac{E}{2\varphi} - 1. \quad (7.11)$$

Керамика обладает дефектной структурой, обусловленной образованием микротрещин и дислокаций, внедрением в кристалличе-

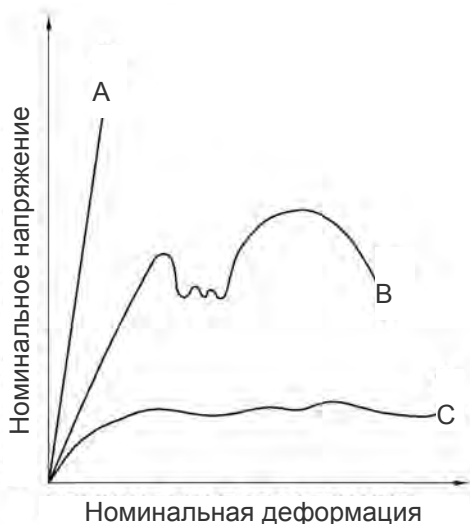


**Рис. 7.8.** Классическая зависимость напряжение – деформация керамики (A), металлов (B) и высокомолекулярных соединений (C)

скую решетку примесных ионов. Дефекты снижают прочность материала. Теоретическая прочность керамики составляет около  $1...5 \cdot 10^4$  МПа. Фактическая прочность зависит от вида керамики, характера и количества дефектов. Наибольшей прочностью обладает оксидная керамика кристаллического строения. Предел прочности при статическом изгибе для керамики с большим количеством стеклофазы (например, фарфора) – может достигать до 100 МПа. Одной из существенных причин, способствующих разрушению, может явиться различие коэффициентов термического расширения отдельных фаз, которое приводит к повышению напряжений на границах этих фаз в случаях изменения температуры материала. Снижению прочности керамики способствуют поры, зачастую внутрикристаллические, а также мелкие и мельчайшие трещины, которые концентрируют напряжения.

Влияние пористости на прочность можно выразить уравнением:

$$R = R_0 e^{-b\Pi}, \quad (7.12)$$

где  $R_0$  – прочность материала без пор;  $b$  – константа;  $\Pi$  – объем пор в долях от единицы.

Наличие поры в материале вызывает увеличение концентрации напряжений вокруг нее до 2 раз сравнительно с величиной напряжений в окружающей матрице материала.

Керамика мелкозернистого строения, как правило, более прочна, чем крупнозернистая, при одном и том же химическом и фазовом составе.

Значения прочности керамических материалов колеблются в широком диапазоне. Так, если для грубой (строительной) керамики предел прочности на сжатие колеблется от 10 до 30 МПа, то для технической корундовой керамики он составляет 200-300 МПа.

Прочностные свойства керамики с повышением температуры, как правило, снижаются.

В ряде случаев керамика работает в напряженном состоянии, находясь под усилиями сжатия или растяжения. Способность керамики выдерживать эти постоянные нагрузки при высокой температуре оценивают методом определения температуры начала деформации при нагрузке 0,2 МПа.

При низких температурах керамика разрушается как хрупкое тело, пластическая деформация почти полностью отсутствует. Разрушение происходит как по стекловидной фазе, так и по кристаллам.

В некоторых случаях в керамике чисто кристаллического строения разрушение происходит по границам зерен, не нарушая их целостности.

Если в керамике содержится значительное количество стеклофазы, то разрушение происходит в первую очередь по стеклу, которое обладает меньшей прочностью.

Особым видом необратимой деформации является *ползучесть*, когда пластическая деформация в материале со временем возрастает при действии статической нагрузки. Эта деформация обусловлена, главным образом, скольжением по границам между отдельными кристаллами или перемещениями дислокаций. При высоких температурах наблюдается также пластическая деформация, вызываемая скольжением границ зерен. В частности, при наличии на границах зерен стекловидной фазы при высоких температурах вязкость снижается, и скольжение границ зерен происходит легко и свободно.

Удельная *теплоемкость* керамики удовлетворительно описывается аддитивной формулой:

$$c = \sum_{i=1}^n c_i m_i, \quad (7.12)$$

где  $c_i$  – удельная теплоемкость  $i$ -той фазы;  $m$  – массовая доля фазы.

Средняя теплоемкость глиняного кирпича 0,74, шамотных изделий 1,04 кДж/(кг·°C). Теплоемкость существенно изменяется при низких температурах и незначительно при высоких, особенно после 1000°C. На величину теплоемкости в определенной мере влияют дефекты кристаллической решетки материала и некоторые другие факторы.

*Термическое расширение* керамических материалов происходит, главным образом, вследствие увеличения при их нагревании амплитуды колебаний атомов относительно среднего положения. Для характеристики температурного расширения используют объемный ( $\beta$ ) и линейный ( $\alpha$ ) коэффициенты (к.т.р.). Последний находят по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{L} \left( \frac{dL}{dT} \right), \quad (7.13)$$

где  $L$  – первоначальная длина образца вдоль выбранного направления.

Объемное расширение  $\beta$  принимается  $\beta = 3\alpha$ .

Значения к.т.р. зависят от кристаллической структуры материала, сил связи между структурными элементами.

На границе двух соприкасающихся фаз с разным коэффициентом термического расширения действуют напряжения сжатия на фазу с большим коэффициентом термического расширения и напряжения растяжения – на фазу с меньшим коэффициентом термического расширения. При превышении напряжения сверх некоторого критического появляются трещины.

*Теплопроводность* керамики при кондуктивной передаче теплоты изменяется обратно пропорционально температуре:

$$\lambda_k \approx \frac{1}{k_1 T} + k_2, \quad (7.14)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – константы.

В условиях воздействия теплового излучения:

$$\lambda = \lambda_k + \lambda_u, \quad (7.15)$$

где  $\lambda_u$  – радиационная теплопроводность ( $\lambda_u \sim T^3$ )

Особенно сильно влияют на теплопроводность поры, представляющие собой микроразрывы в виде тонких плоскостей толщиной  $10^{-5} \dots 10^{-4}$  см. Теплопроводность теплоизоляционных керамических материалов слабо зависит от состава твердой фазы и определяется главным образом пористостью и характером структуры.

Для многофазных керамических материалов при  $T > 500^\circ\text{C}$ , когда сказывается передача теплоты излучением, применяют эмпирические формулы вида:

$$\lambda = a + bT \pm cT^3, \quad (7.16)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – эмпирические константы.

Скорость распространения тепла (температуры) характеризуется *температуропроводностью*, связанной с  $\lambda$  зависимостью:

$$a_t = \lambda / \rho_0 c, \quad (7.17)$$

где  $\rho_0$  – средняя плотность,  $\text{кг/м}^3$ ;  $c$  – теплоемкость  $\text{Дж/}(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ .

Разрушение керамики при многократных термических воздействиях обусловлено возникновением градиентов температур (напряжения I рода), а также анизотропным расширением, локальными химическими реакциями, неравномерным изменением объема при полиморфизме и т.п. (напряжения II рода). Предложен ряд критериев *термостойкости* керамики с учетом условий службы изделий. Основные из них: число теплосмен, при котором изделие



разрушается при определенном режиме нагревания и последующего охлаждения; потеря механической прочности образца после определенного числа теплосмен; предельный температурный перепад, при котором изделие разрушается или ухудшаются его технические свойства.

Коэффициент термической стойкости  $K$  связан с его теплопроводностью  $\lambda$ , пределом прочности при разрыве  $R_p$ , теплоемкостью  $C$ , плотностью  $\rho$ , коэффициентом термического расширения  $\alpha$  и модулем упругости  $E$ :

$$K = \frac{\lambda R_p}{c \rho \alpha E}. \quad (7.18)$$

Зависимость (7.18) позволяет определить возможные направления получения термостойких материалов. Это прежде всего уменьшение коэффициента термического расширения, увеличение коэффициента теплопроводности и снижение модуля упругости. Термическая стойкость также в большой мере зависит от особенностей микро- и макроструктуры материала. Например, плотные спекшиеся материалы имеют более высокую термостойкость при крупной кристаллизации основной фазы.

*Огнеупорность* – свойство материала противостоять, не расплавляясь воздействию высоких температур. Появление расплава у многофазных керамических материалов наблюдается при более низких температурах чем температура плавления, каждой из кристаллических фаз. Огнеупорность и температура плавления тождественны только для однокомпонентных систем, например, для высокоогнеупорных материалов из чистых оксидов. Огнеупорные керамические материалы имеют огнеупорность от 1580 до 1770°C, высокоогнеупорные выше 1770°C.

Огнеупорность керамического сырья зависит от его химического состава. Так, глинозем повышает огнеупорность глин, щелочные оксиды являются наиболее сильными плавнями, оксиды щелочно-земельных металлов также являются плавнями, но их флюсующее действие проявляется при более высокой температуре. Огнеупорность материалов, содержащих железистые оксиды, зависит от химического характера газовой среды при обжиге, восстановительная среда существенно понижает огнеупорность.

В процессе эксплуатации керамические изделия взаимодействуют с твердыми, жидкими и газообразными агрессивными средами.

Для работы в условиях высокоагрессивных сред изготавливают специальные химически стойкие керамические изделия. На них не оказывают разрушающего действия многие химически активные соединения (кроме плавиковой и горячей фосфорной кислот).

Увеличение *кислотостойкости* достигается при уменьшении в керамике содержания щелочных и щелочеземельных оксидов. Высокая химическая стойкость также как и улучшенные механические свойства обеспечиваются при благоприятном сочетании в составе керамики стеклофазы и кристаллических фаз (в особенности муллита). Растворимость керамических изделий в кислотах и щелочах возрастает с уменьшением степени муллитизации и увеличением длительности воздействия агрессивной среды.

Распространенным видом химического воздействия на керамику особенно в условиях высоких температур является взаимодействие с газообразными веществами. Огнеупорная керамика должна противостоять действию газообразных галогенидов, сернистого газа, оксидов азота, различных углеводородов и др. газов. Если в состав керамики входят элементы с переменной валентностью, то при действии газовой среды возможно протекание окислительно-восстановительных реакций с образованием более легкоплавких соединений. Агрессивное действие на огнеупоры оказывает оксид углерода, вызывающий восстановление оксидов, входящих в материалы и осаждение углерода в виде сажи. Воздействие газов усиливается во влажной среде и повышенных температурах. Стойкость керамики против газообразных реагентов зависит от ее химической природы и структурных особенностей.

Керамические изделия, содержащие известь, разрушаются в результате гидратации  $\text{CaO}$  водяными парами. В легкоплавких глинах часто присутствуют известняковые включения, которые образуют один из наиболее распространенных дефектов керамики – т.н. “*дутки*”.

Наряду с химическими керамика может быть подвержена физическим видам коррозии. Для изделий, работающих в условиях насыщения водой и знакопеременной температуры, к таким видам коррозии можно отнести циклическое воздействие замораживания и оттаивания. Высокая *морозостойкость* керамических материалов также как и других материалов достигается при удовлетворительном соотношении закрытых или резервных и открытых пор. Пóry

размером до 0,25 мкм практически не заполняются водой из-за трудности удаления из них воздуха. Содержание более 50% таких пор в материале обеспечивает высокую морозостойкость. Опасными считают особенно поры размерами 0,25-1,4 мкм, полностью заполняемые замерзающей водой с возникновением больших давлений. В глиняном кирпиче пористость от поверхности к центру уменьшается, в центре она на 8-16% меньше. Это негативно сказывается на морозостойкости, прежде всего поверхностных слоев материала, учитывая, что миграция влаги при замораживании идет в направлении теплового потока и слои замораживаемых изделий, содержащие максимальное количество воды, будут испытывать и наибольшие разрушающие усилия.

#### 7.4. Основные виды строительных керамических материалов

**Классификация.** Строительные керамические материалы классифицируют по признакам структуры и назначению в зданиях и сооружениях.

Различают *плотные* керамические материалы с пористостью менее 5%, водопоглощением 2-4% по массе (клинкерный кирпич, плитки для полов, канализационные трубы и др.) и *пористые* – с пористостью более 5% и водопоглощением обычно 8-20% по массе (кирпич, черепица, дренажные трубы, терракота и др.).

В зависимости от степени однородности и зернистости строительную керамику условно разделяют на *грубую* (кирпич, плитки для пола, трубы, черепица и др.) и *тонкую* (облицовочные плитки, санитарно-строительные изделия, майолика и др.). Основные группы строительных керамических материалов по назначению приведены в табл. 7.3.

Роль строительных материалов могут выполнять также керамические материалы, выделяемые в отдельные группы: огнеупоры, предназначенные для использования в условиях высоких температур в различных тепловых агрегатах; химически стойкая керамика, способная в течение длительного времени противостоять действию химических реагентов и предназначенная для устройства конструктивных элементов зданий и сооружений, работающих в агрессивных средах, транспортирования и хранения различных веществ;

## 7. Керамические материалы

техническая керамика, отличающаяся рядом специальных свойств, позволяющих применять ее в конструкционных, электроизоляционных, электровакуумных и других изделиях.

Таблица 7.3

### Классификация строительных керамических материалов по назначению

| Назначение материалов в элементах зданий и сооружений | Виды изделий                                                 |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Стеновые                                              | кирпич, керамические камни, блоки и панели из них            |
| Для перекрытий и кровель                              | блоки, панели, специальные камни, черепица                   |
| Фасадные                                              | лицевой кирпич, фасадные плиты и плитки, терракота           |
| Для внутренней облицовки                              | плитки, фасонные детали, печные изразцы                      |
| Для дорог и полов                                     | клинкер, плиты, плитки                                       |
| Санитарно-строительные                                | умывальники, унитазы, ванны                                  |
| Для подземных коммуникаций                            | дренажные и канализационные трубы                            |
| Теплоизоляционные                                     | ячеистая керамика, диатомовые и шамотные легковесные изделия |
| Заполнители бетона                                    | керамзит, аглопорит                                          |

Разновидностями керамики, применяемыми в строительстве, являются *майолика* – керамика из цветной обожженной глины с крупнопористой структурой, покрытая глазурью, *терракота* – однотонная неглазурованная естественно окрашенная керамика; *фаянс* – мелкопористый керамический материал, покрытый прозрачной легкоплавкой глазурью; *фарфор* – спеченный керамический материал белого цвета, просвечивающий в тонком слое.

**Основные технологические процессы.** Из основных производственных процессов получения строительных керамических изделий следует выделить: добычу глины и подготовку сырьевых материалов; приготовление керамической массы; формование изделий, сушку и обжиг.

При разработке глиняных карьеров применяют в основном многоковшовые экскаваторы, срезающие глиняную стружку по всей высоте и длине фронта добычи. Для измельчения глинистых минералов наиболее часто применяют валковые дробилки.

Подготовленные материалы керамической массы тщательно смешиваются. Различают три способа приготовления керамической массы – пластический, полусухой и шликерный.

При *пластическом* способе керамическая масса имеет влажность 18 – 23%. Она может быть получена или непосредственно из глины с карьерной влажностью, смешанной с добавками, или из сухих порошков с последующим увлажнением.

При *полусухом* способе керамическая масса имеет влажность 8- 12%. Ее получают путем предварительной сушки, измельчения и смешивания компонентов.

При *шликерном* способе керамическая масса является жидкотекучей и имеет вид суспензии (шликера) с влажностью 30- 35%.

Пластический способ более приемлем при использовании глин с повышенной карьерной влажностью, хорошо размокающих в воде, а полусухой способ – при плотной структуре глиняного сырья и низкой исходной влажности. Шликерный способ применяется в тех случаях, когда необходимо достигнуть особо тщательного смешивания исходных компонентов (фарфоро-фаянсовое производство, изготовление облицовочных плиток).

Способ формования керамических изделий зависит от консистенции керамической массы. Из пластичных масс изделия формуют на ленточных прессах, где масса уплотняется шнековым механизмом и выходит из мундштука в виде ленты определенного сечения, которая разрезается на изделия заданных размеров. Таким образом, получают обыкновенный кирпич (рис.7.9), пустотелые изделия, трубы и т. п.

Из полусухих порошкообразных масс изделия формуются на прессах высокого давления (10-30 МПа и более). При полусухом прессовании сокращается сушка сырца – длительный и сложный процесс. Из порошкообразных масс изготавливаются стеновые керамические.

Шликеры применяют для отливки сложных по конфигурации и тонкостенных изделий (санитарно-техническая, декоративная, химически стойкая керамика и др.). Этот метод формования основан на свойстве гипсовых форм впитывать в себя часть воды из залитого в них шликера.

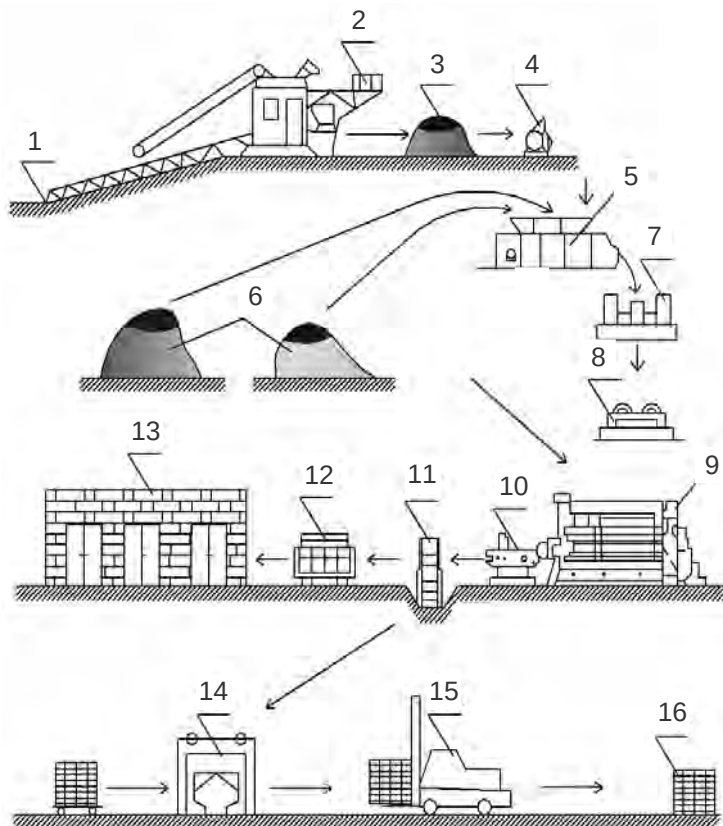


**Рис. 7.9.** Технологическая схема производства керамического кирпича пластическим способом: 1 – карьер глины; 2 – экскаватор; 3 – глинозапасник; 4 – вагонетка; 5 – ящичный подаватель; 6 – добавки; 7 – бегуны; 8 – вальцы; 9 – ленточный пресс; 10 – резак; 11 – укладчик; 12 – тележка; 13 – сушильные камеры; 14 – туннельная печь; 15 – самоходная тележка; 16 – склад

Отформованные изделия сушат, чтобы придать им прочность, необходимую при обжиге. Различают конвективную и радиационную сушку. В первом случае теплота передается от теплоносителя – дымовых газов или воздуха, а в другом – она излучается от нагретых поверхностей. Для сушки изделий подбирают оптимальный режим, при котором сушильное устройство имеет максимальную производительность, а срок сушки и количество брака минимальные. Распространены тун-

нельные и конвейерные сушилки непрерывного действия, обеспечивающие высокую производительность и поточность производства.

Решающей стадией технологии керамических изделий, при которой формируются свойства керамики, является обжиг. При обжиге сначала удаляется механически и гигроскопически связанная вода из глины, а затем при достижении 400-450°C происходит дегидратация глинистого вещества и выгорание органических примесей. Образование жидкой фазы в виде стекловидных расплавов начинается уже с температуры около 700°C и в последующем интенсивно развивается по мере повышения температуры обжига. Стекловидные расплавы склеивают в единый монолит отдельные зерна керамической массы. Спекание керамических масс может происходить и за счет реакций в твердой фазе. Самым важным кристаллическим новообразованием при обжиге керамических масс является минерал муллит, который наиболее интенсивно образуется в интервале температур 1000-1200°C.

Для обжига изделий каждого вида устанавливается определенный температурный режим. Если керамику обжигают при температуре ниже требуемой, она имеет повышенную пористость и невысокую прочность, при чрезмерно высокой температуре, хотя и возрастает прочность, изделия могут деформироваться и оплавляться.

На современных керамических предприятиях процесс обжига изделий протекает в печах различной конструкции: туннельных, кольцевых, шелевых, роликовых и др.

**Стеновые материалы.** Керамические материалы, применяемые для возведения стен зданий различного назначения, относятся к числу наиболее древних и, вместе с тем, наиболее широко применяемых в настоящее время строительных материалов. Стеновые керамические материалы разделяют:

- по виду изделий – на кирпич, камни, блоки и панели;
- по назначению – на *рядовые* – для кладки наружных и внутренних стен и *лицевые* – для кладки и облицовки стен зданий и сооружений;
- по способу изготовления – на изделия пластического и полусухого прессования.

*Керамический кирпич* изготавливают полно – и пустотелым, *керамические камни* – пустотелыми. Пустоты размещаются перпендикулярно или параллельно наибольшей грани изделий ("постели"), они могут быть сквозными и несквозными.

## 7. Керамические материалы

Керамические кирпич и камни имеют форму прямоугольного параллелепипеда и отличаются (ГОСТ 530-2007) размерами (табл. 7.4 и 7.5). Характерные виды кирпича и камней приведены на рис. 7.10. Нормируемые дефекты внешнего вида кирпича и камней приведены ниже.

| Дефекты                                     | Лицевые изделия | Рядовые изделия |
|---------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Отбитости углов:                            | не допуска-     |                 |
| глубиной более 15 мм                        | ются            | 2               |
| глубиной от 3 до 15                         | 1               | 4               |
| Отбитости ребер:                            |                 |                 |
| глубиной более 3 мм и длиной более 15 мм    | не допуска-     | 2               |
| глубиной не более 3 мм и длиной более 15 мм | ются            |                 |
|                                             | 1               | 4               |
| Отдельные посечки суммарной длиной, мм:     |                 |                 |
| для кирпича                                 | 40              | не регла-       |
| для камня                                   | 80              | ментиру-        |
|                                             |                 | ются            |
| Трещины, шт                                 | не допуска-     | 2               |
|                                             | ются            |                 |

Таблица 7.4

Номинальные размеры керамического кирпича

| Вид изделий                            | Обозначение | Номинальные размеры |        |         |
|----------------------------------------|-------------|---------------------|--------|---------|
|                                        |             | Длина               | Ширина | Толщина |
| Кирпич нормального формата (одинарный) | КО          | 250                 | 120    | 65      |
| Кирпич "Евро"                          | КЕ          | 250                 | 85     | 65      |
| Кирпич утолщенный                      | КУ          | 250                 | 120    | 88      |
| Кирпич модульный одинарный             | КМ          | 288                 | 138    | 65      |

**Примечания. 1.** Предельные отклонения номинальных размеров не должны превышать, мм: по длине  $\pm 4$ ; по ширине  $\pm 3$ ; по толщине  $\pm 3$  для лицевого кир-



пича  $\pm 2$ ). 2. Отклонения от перпендикулярности смежных граней и от плоскостности граней не допускаются более 3 мм.

Таблица 7.5

Номинальные размеры керамических камней

| Вид изделий                        | Обозначение | Номинальные размеры, мм |        |         |
|------------------------------------|-------------|-------------------------|--------|---------|
|                                    |             | Длина                   | Ширина | Толщина |
| Камень                             | К           | 250                     | 120    | 140     |
|                                    |             | 288                     | 288    | 88      |
|                                    |             | 288                     | 138    | 140     |
|                                    |             | 288                     | 138    | 88      |
|                                    |             | 250                     | 250    | 140     |
|                                    |             | 250                     | 180    | 140     |
| Камень крупноформатный             | КК          | 510                     | 250    | 219     |
|                                    |             | 398                     | 250    | 219     |
|                                    |             | 380                     | 250    | 219     |
|                                    |             | 380                     | 255    | 188     |
|                                    |             | 380                     | 250    | 140     |
|                                    |             | 380                     | 180    | 140     |
| Камень с горизонтальными пустотами | КГ          | 250                     | 200    | 70      |

**Примечание. 1.** Предельные отклонения номинальных размеров не должны превышать, мм: для камня (К) – по длине  $\pm 4$ ; ширине  $\pm 3$ ; толщине  $\pm 4$ ; для камня крупноформатного (КК) соответственно:  $\pm 10$ ;  $\pm 5$ ;  $\pm 4$ . 2. Отклонения от перпендикулярности смежных граней не допускается более 3 мм, для крупноформатного камня – более 1,4% длины любой грани. 3. Отклонение от плоскостности граней не допускается более 3 мм.

Качество керамических изделий существенно снижается как при “недожоге” так и “пережоге”, наличии известковых включений, которые после испытания пропариванием вызывают откалывания, и другие виды повреждений.

По средней плотности  $\rho_0$  изделия разделяют на 5 классов:

$0,8 - \rho_0 \leq 800 \text{ кг/м}^3$ ;  $1,0 - \rho = 801-1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $1,2 - \rho_0 = 1000-1200 \text{ кг/м}^3$ ;  $1,4 - 1201-1400 \text{ кг/м}^3$ ;  $2,0 - \rho_0 > 1400 \text{ кг/м}^3$ .

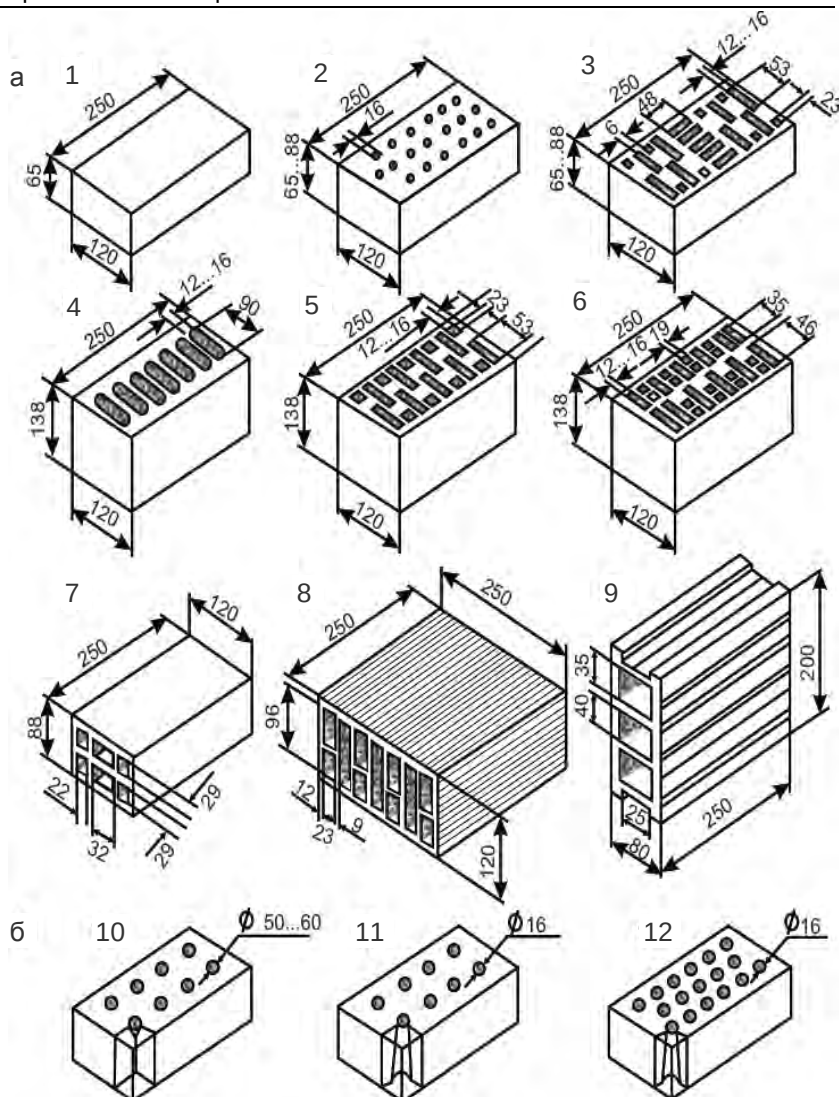


**Рис. 7.10.** Кирпич и камни керамические:  
 а – пластического формования: 1 – кирпич полнотелый;  
 2, 3, 7 – кирпич пустотелый с различной пустотностью;  
 4, 5, 6, 8, 9 – камень с различной пустотностью;  
 б – полусухого формования: 10 – кирпич с несквозными  
 отверстиями; 11, 12 – кирпич со сквозными отверстиями

В зависимости от коэффициента теплопроводности кладки в сухом состоянии ( $\text{Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$ ) стеновые керамические изделия разделяют соответственно на 5 групп – высокой эффективности – до 0,20; повышенной эффективности – свыше 0,20 до 0,24; эффективные – свыше 0,24 до 0,36; условно эффективные свыше 0,36 до 0,46; мало эффективные (обыкновенные) – свыше 0,46.

Марку кирпича по прочности устанавливают по значениям предела прочности при сжатии и изгибе, камня – по значению предела прочности при сжатии. С этой целью определяют среднее значение прочности для пяти образцов, при этом учитываются также наименьшие значения прочности для образцов, полученные при испытании. Численное значение марки ( $\text{МПа}\cdot 10$ ) должно быть не выше среднего значения предела прочности образцов при сжатии.

Для одинарных, “евро”, утолщенного и модульного кирпичей, а также камней установлены марки: М100, М125, М150, М175, М200, М250, М300; для крупноформатных камней дополнительно нормируются также марки М75, М50 и М35; для кирпича и камней с горизонтальным расположением пустот марки – М100, М75, М50, М35 и М25.

Для возведения несущих стен марка полнотелого кирпича должна быть не ниже М125, самонесущих – М100, для возведения дымовых труб – не ниже М200.

Водопоглощение рядовых изделий должно быть не менее 6%, лицевых изделий – не менее 6% и не более 14%. Для изделий, изготовленных из трепелов и диатомитов, допускается водопоглощение не более 28%.

Марки кирпича и камней по морозостойкости: F25, F35, F50 и F100. Марка по морозостойкости лицевых изделий должна быть не ниже F50 (при согласовании с потребителем не ниже F35). При испытании на морозостойкость изделия должны выдерживать требуемое число циклов замораживания и оттаивания без видимых признаков повреждений.

Кирпичные стены зданий из полнотелого кирпича в средней полосе России возводят, как правило, в 2,5 кирпича толщиной (без воздушной прослойки) 64 см. При применении пустотелого кирпича средней плотностью  $1300\text{--}1450 \text{ кг}/\text{м}^3$  уменьшается толщина стены на полкирпича, масса на 35%, расходы раствора на 45%.

Лицевые кирпичи и камни могут изготавливаться с гладкой, рельефной и офактуренной поверхностью. С гладкой и рельефной поверхностью выпускаются изделия, получаемые при обжиге глины без или с введением в сырьевые смеси красящих добавок. Для создания офактуренной лицевой поверхности кирпича и камней применяют торкретирование минеральной крошкой, ангобирование, глазурирование или двухслойное формование.

*Ангоб* – белая или цветная керамическая масса, которую наносят на поверхность изделий до их обжига в виде тонкого слоя. Ангобированная поверхность имеет матовую текстуру.

*Глазури* – тонкие стекловидные покрытия на керамических изделиях. Сырьевые смеси для получения глазури наносят на поверхность изделий в виде суспензии заданного состава и закрепляют обжигом. Глазури позволяют получать покрытия с любыми цветовыми оттенками и сохранять их яркость на протяжении длительного времени. Для глазурирования кирпича и камней применяют легкоплавкие составы, содержащие плавни – соду, буру, поташ и др., а также красители в виде оксидов некоторых металлов.

*Двухслойный кирпич*, кроме основного имеет лицевой слой толщиной 3-5 мм из светложгущихся глины с возможным добавлением пигмента.

Задача индустриального применения керамического кирпича и камней может решаться изготовлением из них на стендах или заводах блоков и панелей, из которых потом монтируют стены.

**Облицовочные изделия.** Кроме лицевых керамических кирпича и камней, которые могут выполнять двойную функцию – как стеновых, так и облицовочных материалов. В качестве последних для отделки внешних и внутренних стен, защиты их от агрессивного воздействия окружающей среды и улучшения санитарно-гигиенического состояния помещений, устройства покрытий полов, архитектурных элементов зданий и сооружений применяют ряд других керамических материалов.

*Керамические фасадные плитки и ковры* из них (ГОСТ 13396-93) предназначены для облицовки цоколей и стен зданий и сооружений. Их изготавливают глазурованными и неглазурованными, гладкими и блестящими, с рельефной поверхностью. Керамические плитки рядовые и ковры из них применяют для облицовки внешних стен, стеновых панелей и больших блоков, фриз, обрамления оконных

и дверных проемов, других архитектурных элементов зданий (рис. 7.11). Для облицовки цоколей сооружений и подземных переходов применяют преимущественно фасадные глазурованные плитки.

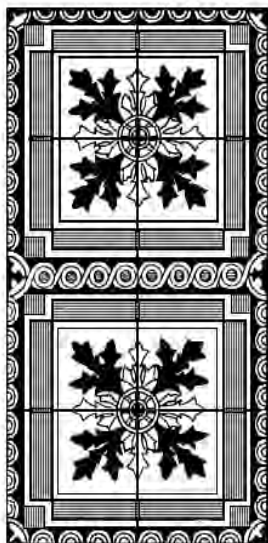


**Рис. 7.11.** Фрагмент пола из керамических плиток с рисунком

Плитки изготавливают квадратной и прямоугольной формы с координационными размерами (суммарной величиной номинальных размеров и ширины растворного шва – 4-8 мм) от 50×50 до 300×150 мм и толщиной 4-9 мм (табл.7.6).

Мелкоразмерные фасадные плитки выпускают размерами до 200 мм и в виде ковровой керамики. Из мелкоразмерной керамической плитки набирают панно, картины и другие мозаичные композиции. Крупноразмерные фасадные плитки имеют размер более 200 мм.

Нелицевая (монтажная) поверхность плиток должна иметь рифления – пазы (глубиной) или выпуклости (высотой) не менее 0,7 мм при длине изделий до 50 мм и 2 мм – более 50 мм.

Лицевая поверхность плиток может быть гладкой или рельефной, неглазурованной, частично или полностью покрытой одно- или многоцветной глазурью, или декорированной различными методами. Плитки могут изготавливаться с округленной гранью со стороны лицевой поверхности (завалом). На лицевой поверхности плиток не допускаются трещины и цек.

Физико-механические показатели плиток должны соответствовать указанным в табл. 7.7.

Для изготовления ковров применяют плитки прямоугольной и квадратной формы площадью не более 115 см<sup>2</sup>, для изготовления ковров “брекчия” – части плиток произвольной формы площадью не менее 3 см<sup>2</sup>. Номинальные размеры ковров устанавливают по согласованию предприятия-изготовителя с потребителем. Ковры из плиток изготовляют наклеиванием их лицевой поверхностью на бумагу массой 1 кв.м не менее 70 г клеем, который должен легко смываться после облицовки.

Размеры фасадных керамических плиток

| Координационные размеры, мм |        | Номинальная толщина, мм |
|-----------------------------|--------|-------------------------|
| Длина                       | Ширина |                         |
| 50                          | 50     | 4                       |
| 120                         | 65     | 7                       |
| 125                         | 60     |                         |
| 140                         | 120    |                         |
| 150                         | 75     |                         |
| 150                         | 100    | 7; 9                    |
| 150                         | 150    |                         |
| 200                         | 100    |                         |
| 200                         | 150    | 9                       |
| 200                         | 200    |                         |
| 240                         | 65     | 7; 9                    |
| 250                         | 65     |                         |
| 250                         | 100    |                         |
| 300                         | 100    | 9                       |
| 300                         | 150    |                         |

Ковры бывают трех типов: с прямолинейной ориентацией плиток (тип I), неорганизованным набором плиток (тип II) и брекчиевидными из частей плиток произвольной формы (тип III).

Наряду с традиционными облицовочными керамическими изделиями для фасадных систем современных зданий, облицовки подземных переходов и др., применяют *крупноразмерные керамические плиты* квадратной или прямоугольной формы. Их длина 490, 990, 1190 мм, ширина – 490 и 990 мм, толщина – 6...10 мм. Они выпускаются одно- и многоцветными, глазурованными или неглазурованными с гладкой или рельефной поверхностями. Водопоглощение плит менее 1%, морозостойкость 0 не менее 50 циклов. Плиты крепят с помощью металлических раскладок.

*Архитектурно-художественная (декоративная) керамика* широко применяется в виде настенных панно, декоративных вставок, объемных композиций, элементов малых форм и др. Изделия изготавливают из глинистых материалов пластическим, полусухим способами, а также литьем.

Для фасадных керамических архитектурных деталей предъявляются требования по водопоглощению, морозостойкости, термиче-

Часть II. Характеристика основных строительных материалов

ской стойкости и твердости глазури такие же, как для фасадной плитки.

Таблица 7.7

Физико-механические свойства фасадных плиток

| Наименование показателя                                                                          | Значение для плиток |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------|
|                                                                                                  | стенowych           | цокольных |
| Водопоглощение, % :                                                                              |                     |           |
| – не менее                                                                                       | 2                   | 2         |
| – не более                                                                                       | 9                   | 5         |
| для плиток, изготовленных из масс, содержащих шлаки, полиминеральные глины и карбонаты, не более | 12                  | –         |
| Морозостойкость, циклы, не менее                                                                 | 40                  | 50        |
| Термическая стойкость глазури, °С, не менее                                                      | 125                 | 125       |
| Предел прочности при изгибе, МПа, не менее                                                       | 16                  | 8         |
| Твердость глазури, не менее                                                                      | 5                   | 5         |

Находят широкое применение терракотовые и майоликовые изделия.

Для изготовления *терракотовых* – неглазурованных естественно окрашенных керамических изделий применяют глины, в которых нет включений известняка, крупных зерен кварца и не содержатся растворимые соли, дающие выцветы. Обычные тона терракоты – кремовый, красноватый и коричневатый с широкой гаммой оттенков. Водопоглощение терракоты 8-10%.

Из терракоты желтого, розового, красного и других цветов изготавливают барельефы, карнизы, капители, фризy и другие детали для оформления многоэтажных зданий.

Разнообразную цветовую окраску терракоты достигают введением в шихту неорганических пигментов (охры, оксида хрома и т.п.).

К изделиям из терракоты предъявляют те же основные требования, что и к лицевому кирпичу. В зависимости от характера и размера пор изделия могут быть тонко- или грубопористыми.

*Майоликовые изделия* (плитки, элементы декора) получают из мергелистых легкоплавких глин с добавлением до 20% мела. Полученную после обжига керамику покрывают цветной глазурью.

Высококачественным материалом для облицовки фасадов, полов, ступеней, является *клинкерная плитка*. Ее изготавливают об-

жигом до полного спекания тугоплавких глин. Водопоглощение плитки менее 3%, она имеет высокую морозо- и коррозионную стойкость. Клинкерная плитка имитирует лицевой кирпич, она используется для замены кирпича в тех местах, где применение его затруднено (дверные проемы, углы). Ее выпускают с гладкой и рустованной поверхностью, неглазурованной и глазурованной.

*Керамический гранит (керамогранит)* – материал, получаемый прессованием с последующим обжигом из массы, состоящей из глин, полевых шпатов и инертных маложелезистых наполнителей. Керамогранит обладает более высокими показателями прочности, износостойкости, морозостойкости по сравнению с другими видами керамических плиток. Его водопоглощение ничтожно мало (до 0,05%). Он не реагирует на воздействие кислот и щелочей даже в

концентрированном виде (за исключением плавиковой кислоты и ее производных).

В зависимости от способа обработки поверхность керамогранита может быть полированной, матовой (лощеной), рельефной (под “дикий камень”) и нескользящей (с рисунком в виде насечек). Керамогранит выпускается глазурованным и неглазурованным. По текстуре и свойствам керамогранит может не уступать высокопрочным ви-



**Рис.7. 12.** Образцы керамогранита

дам природных каменных материалов. Выпускается также керамогранит под венецианскую штукатурку, имитирующий дерево и т.д.

Распространенные размеры плитки из керамогранита: 20×20, 30×30, 30×60, 40×40 см. Производят также керамогранитную плитку 60×60, 60×90, 120×60 см и др. Наибольшее распространение получили облицовочные элементы толщиной 5, 8, 12 и 15 мм.

Керамогранит (рис. 7.12) применяют для фасадной и внутренней облицовки стен зданий различного назначения. Эффективной областью применения керамогранита является отделка вентилируемых



фасадов. При их монтаже крупные керамогранитные плиты толщиной 11-14 мм крепятся на металлический каркас, под которым размещен слой теплоизоляции. Наряду с отделкой стен керамогранит широко применяется для облицовки лестниц, покрытий полов в помещениях особенно при значительных истирающих нагрузках (супермаркеты, кинотеатры, вокзалы, станции метро и др.), а также высоких статических и динамических нагрузках, воздействию химически агрессивных веществ и повышенных температур. Керамогранит может применяться и для внешних работ (дворы, подъездные дорожки, бордюры).

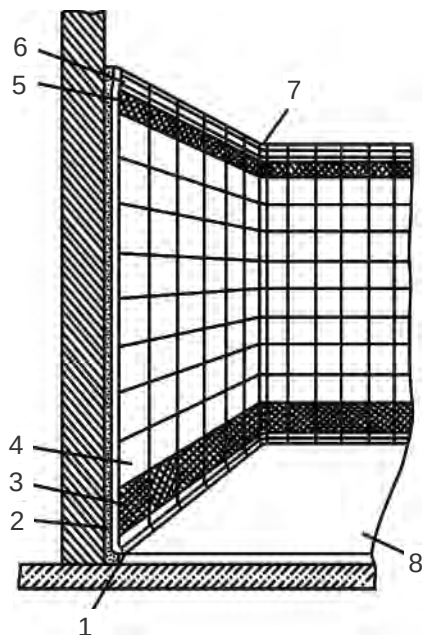


**Рис. 7.13.** Структура облицовочного покрытия:  
1 – фасонные плитусные керамические глазурованные плитки прямые; 2 – подготовка и прослойка из раствора под покрытие плитками; 3 – цокольная квадратная плитка цветная; 4 – рядовая облицовочная глазурованная плитка; 5 – фризровая плитка прямоугольная; 6 – прямая карнизная плитка фасонная; 7 – уголок карнизный для закругления внутренних углов; 8 – пол

мически агрессивных веществ и повышенных температур. Керамогранит может применяться и для внешних работ (дворы, подъездные дорожки, бордюры).

Плитки для внутренней облицовки стен (рис. 7.13, 7.14) изготавливают из майоликовых или фаянсовых масс. Плитки выпускают (ГОСТ 6141-91) квадратными (100×100, 150×150 и 200×200 мм), прямоугольными (100×75, 150×75, 150×100, 200×100 и 200×150 мм) и фасонными (для углов облицовки, карнизов и плинтусов). Толщина плитки 5-8 мм. Наиболее распространены плитки из фаянсовых масс, покрытые прозрачной или непрозрачной (“глухой”) глазурью. Лицевая поверхность плиток может быть гладкой или рельефной, одно- или многоцветной (декорированной), а боковые грани могут быть без завала и с завалом. В зависимости от качественных показателей лицевой поверхности плитки разделяют на сорта. При установлении сорта плиток учитываются кривизна лицевой

поверхности, косоугольность, отбитости, различные дефекты глазури и нарушения декора.

Водопоглощение плиток не должно превышать 16%. Твердость глазури на плитках должна быть не менее 5 по Моосу, термическая стойкость – 150°C для белой глазури и 125°C для цветной. Плитки для внутренней облицовки применяют в помещениях с большой влажностью или с повышенными санитарно-гигиеническими требованиями.

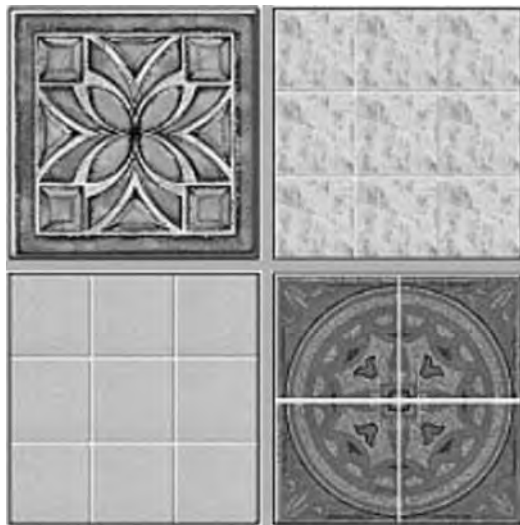


**Рис. 7.14.** Варианты облицовки керамической плиткой

Наряду с плиткой, изготавливаемой полусухим прессованием производятся также *литые керамические плитки и ковры из них*. Эти плитки имеют глазурованную поверхность и применяются для внешней и внутренней облицовки зданий, балконных экранов, колонн, а также для монументально-декоративных работ. Литыми плитками нельзя облицовывать выступающие части зданий, цоколи, карнизы. Водопоглощение плиток должно быть не более 16,5%, морозостойкость – не менее 35 циклов.

При испытании на термическую стойкость на глазурованной поверхности плиток не допускается появление цека и других признаков разрушения при перепаде температур.

Плитки выпускают квадратной и прямоугольной формы длиной 21; 46; 71 и 96 мм, шириной 21 и 46 мм и толщиной 3 и 3,5 мм. Для монументально-декоративных работ допускается изготовление плиток других размеров. Лицевая поверхность плиток покрыта прозрачной или глухой, белой или цветной глазурью. Ковры из литых керамических плиток бывают квадратными или прямоугольными с размерами сторон, кратными 50 мм.

*Плитки керамические для полов* (ГОСТ 6787-2001) предназначены для покрытия полов внутри помещений жилых и общественных

зданий, бытовых помещений промышленных зданий. Плитки изготавливают глазурованными и неглазурованными, квадратными, прямоугольными, многоугольными и фигурными. Наряду с основными выпускаются бордюрные плитки. Координационные размеры, т.е. размеры плиток с учетом ширины шва для квадратных плиток могут изменяться от 500×500 мм до 150×150 мм, прямоугольных – от 500×300 мм до 200×150 мм. Поверхность плиток может быть гладкой или рельефной, одно- или многоцветной, декорированной различными методами.

Глазури для плиток применяют как прозрачные, так и заглашенные. Неглазурованная поверхность может быть полированной. На лицевой поверхности плиток не допускаются трещины, цек (тонкие волосяные трещины глазури), а также видимые с расстояния 1 м плешины, пятна, мушки, волнистость глазури и др., нормируется количество других дефектов (щербин, зазубрин, посечек).

Физико-механические показатели плиток для пола должны быть не ниже значений, приведенных в табл. 7.8.

Для устройства мозаичных полов изготавливают квадратные и прямоугольные керамические плитки размерами 48×48, 22×22, 48×22 мм толщиной 6 мм. Плитки на заводе наклеивают на крафт-бумагу или картон по определенному рисунку, получая ковры, укладываемые на пластичную цементно-песчаную растворную смесь.

Для устройства полов в некоторых промышленных предприятиях, мощения тротуаров и дорог применяют *клинкерный кирпич*. Он может иметь матовую и глянцевую поверхность, различную цветовую гамму. Клинкерный кирпич имеет высокую прочность (М300 и выше), морозостойкость (F100 и выше), коррозионную стойкость, водонепроницаемость. Его получают спеканием тугоплавких глин при более высоких температурах, чем обычный кирпич. Водопоглощение клинкерного кирпича – менее 3%.

**Изделия специального назначения.** Эта группа строительных керамических изделий включает санитарные, кровельные, теплоизоляционные, огнеупорные, кислотостойкие, дорожные, изделия, дренажные и канализационные трубы, легкие заполнители.

*Санитарно-керамические изделия* (ГОСТ 15167-93) – глазурованные изделия, получаемые из смеси белых глин и другого минерального сырья, обожженные при высокой температуре и предназначенные для санитарно-гигиенического и хозяйственного приме-

## 7. Керамические материалы

нения. Они изготавливаются из фарфора, полуфарфора и фаянса и включают умывальники, унитазы, смывные бачки, раковины и др.

Таблица 7.8

Физико-механические свойства керамических плиток для пола

| Показатель                                                             | Значение для плиток |               |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------|
|                                                                        | неглазурованных     | глазурованных |
| Водопоглощение, %<br>не более                                          | 3,5                 | 4,5           |
| Предел прочности при изгибе, МПа, не менее для плиток толщиной:        |                     |               |
| до 9,9 мм                                                              | 28                  | 28            |
| св.9,9 мм                                                              | 25                  | 25            |
| Износостойкость (по кварцевому песку), г/см <sup>2</sup> ,<br>не более | 0,18                | -             |
| Износостойкость, степень                                               | -                   | 1...4         |
| Термическая стойкость глазури, °С                                      | -                   | 125           |
| Морозостойкость, число циклов,<br>не менее                             | 25                  | -             |
| Твердость глазури<br>по Моосу                                          | -                   | 5             |

К общим требованиям, предъявляемым к изделиям этой группы, относятся функциональная пригодность, термическая стойкость и механическая прочность. Изделия из фаянса имеют прочность на сжатие до 100 МПа, водопоглощение – не более 12%, полуфарфора, соответственно, – 150-200 МПа и 3%, фарфора – до 500 МПа и не более 1%. Санитарные изделия покрываются белой или цветной химически и термически стойкой глазурью и декорируются различными методами.

К высокодолговечным кровельным материалам относится *керамическая черепица*. Исторической родиной черепицы является Средиземноморье. Керамические кровли известны более 4000 лет. В Европейских странах черепица является одним из наиболее рас-

пространенных кровельных материалов и в настоящее время. Главными преимуществами ее являются огнестойкость, стойкость к воздействию солнечного излучения, кислотных дождей и температурных изменений. Керамическая черепица не накапливает статическое электричество, хорошо поглощает шумы, имеет сравнительно невысокую теплопроводность. Этот материал является эстетичным, срок службы его превышает сто лет. Недостатками черепицы являются ее большая масса ( $30\text{--}70 \text{ кг/м}^3$ ) и хрупкость. Мелкоразмерность и ручной способ укладки черепицы предопределяет большую трудоемкость устройства черепичной кровли.

По способу производства черепица бывает трех видов: штампованная, пластического (ленточная) и полусухого формования.

Методом штампования производится пазовая черепица (рис. 7.15) и ее разновидности (марсельская, голландская), S-образная, а также коньковая (для оформления конька крыши). Пластическим формованием производятся различные типы ленточной черепицы – пазовая, плоская, S-образная. Наиболее распространена пазовая ленточная черепица длиной 400 мм, шириной 220, 200 и 165 мм. Методом полусу-

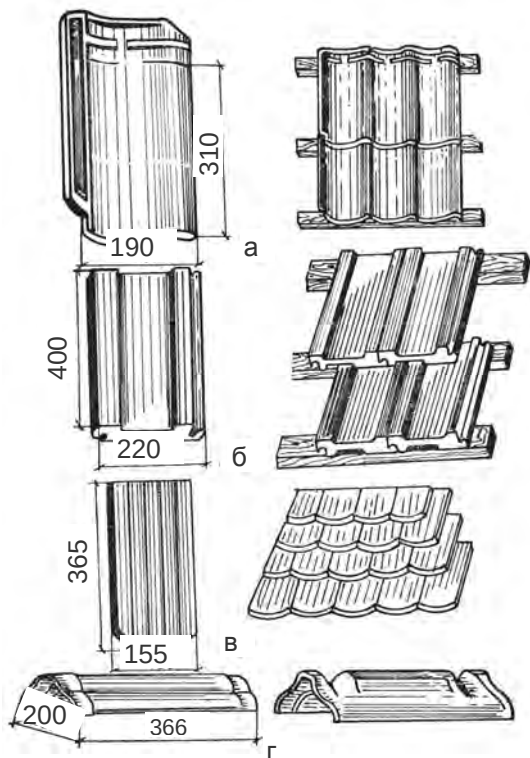


**Рис. 7.15.** Типы черепицы:  
а – штампованная пазовая;  
б – ленточная пазовая;  
в – ленточная плоская;  
г – коньковая

хого формования производятся различные типы ленточной черепицы – пазовая, плоская, S-образная. Наиболее распространена пазовая ленточная черепица длиной 400 мм, шириной 220, 200 и 165 мм. Методом полусу-

хого прессования производится плоская черепица типа “бобровый хвост”.

Черепица может быть изготовлена с ангобированным или глазурным покрытием, наносимым на ее лицевую поверхность. К новым эффективным видам черепицы относится черепица из керамогранита. Черепица должна выдерживать в зависимости от типа разрушающую нагрузку на изгиб не менее 800-1500 Н, быть морозостойкой и при испытании после 25 циклов попеременного замораживания и оттаивания (для черепицы полусухого прессования – 35 циклов) не иметь видимых повреждений.

В зависимости от размеров изготавливают мелкоформатную (более 20 ед. на м<sup>2</sup>), среднеформатную (10-20 ед. на м<sup>2</sup>) и крупноформатную (менее 10 ед. на м<sup>2</sup>) черепицу.

В группу *теплоизоляционных* керамических материалов входят поризованные диатомитовые и трепельные, перлитовые и вермикулитовые изделия и др.

Пористую структуру керамики получают введением выгорающих добавок, вспучиванием в процессе формования за счет газов, выделяющихся при химических реакциях, вспенивания при введении пенообразователя или готовой пены, а также использования пористых заполнителей. Эффективным является способ поризации с одновременным армированием керамических масс высокотемпературным волокном.

Теплоизоляционные изделия в виде кирпича, полуцилиндров, сегментов получают на основе достаточно близких по составу осадочных пород диатомита и трепела. Обе породы состоят в основном из аморфного кремнезема, плотность их 400...600 кг/м<sup>3</sup>. трепел в отличие от диатомита практически не содержит органических примесей. Изделия получают формованием, сушкой и обжигом диатомита или трепела с выгорающими или пенообразующими добавками. Диатомитовые (трепельные) и пенодиатомитовые изделия изготавливают плотностью 400, 500 и 600 кг/м<sup>3</sup>. Теплопроводность их при температуре 50°C – 0,116-0,14, 350°C – 0,186-0,21 Вт/(м °C). Производят также перлитодиатомитовые изделия плотностью 300-400 кг/м<sup>3</sup>.

Эти материалы используют преимущественно для тепловой изоляции печей, трубопроводов и другого теплотехнического оборудования, работающего при температурах до 900°C.

*Перлит* относится к группе вулканических стекол, а *вермикулит* – к группе гидрослюд. Обе породы содержат определенное количество связанной воды, которая при температуре 80-1000°C интенсивно удаляется в виде паров. При обжиге перлита коэффициент вспучивания (отношение размеров зерен после вспучивания к первоначальным) обычно составляет 6-15, вермикулита 15-40. После обжига вспученный перлит разделяется (ГОСТ 10832-2009) на песок с насыпной плотностью 75-500 кг/м<sup>3</sup> и щебень плотностью 200-500 кг/м<sup>3</sup>. теплопроводность перлитового песка 0,043-0,093 Вт/(м·°C). Перлитовый песок и щебень используют в качестве заполнителя в бетонах и растворах для изготовления теплоизоляционных и конструктивно-теплоизоляционных изделий. Перлитовый песок используют, кроме того, для теплоизоляционных, а также огнезащитных штукатурок при температуре изолируемых поверхностей 200-875°C.

Характерная особенность вспученного вермикулита – чешуйчатое строение. Его используют в виде зерен, имеющих крупность до 10 мм, насыпную плотность 100-200 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводность 0,055-0,065 Вт/(м·°C). Возможная температура применения вспученного вермикулита выше, чем перлита и достигает 1100°C.

С применением вспученного перлита и вермикулита возможно получение композиционных керамических изделий, основной технологической операцией при получении которых является обжиг сырьевой смеси, включающей кроме перлита и вермикулита пластичную глину. Также как диатомитовые перлитовые и вермикулитокерамические изделия



**Рис. 7.16.** Керамзитовый гравий

предназначены для тепловой изоляции промышленного оборудования, печей и трубопроводов. По плотности изделия делят на марки 200...400 с теплопроводностью при 25°C 0,063-0,105, при 300°C – 0,116-0,151 Вт/(м·°C).

К легким керамическим материалам, изготавливаемым обжигом глинистого и другого

минерального сырья, относятся керамзит и аглопорит, их разновидности. Их применяют преимущественно как *пористые заполнители* легких бетонов. Эти материалы при необходимой плотности и структуре

применяют также для устройства тепло – и звукоизоляционных засыпок.

*Керамзит* получают обжигом легкоплавких вспучивающихся глин, главным образом, в виде гравия с размером зерен от 5 до 40 мм (рис. 7.16). Освоено также производство керамзитового щебня и песка.

Вспучивание глины при обжиге происходит в результате газовыделения, имеющего место при реакциях восстановления оксидов железа при их взаимодействии с органическими примесями, дегидратации гидрослюд и других глинистых водосодержащих минералов, диссоциации карбонатов. При обжиге за счет образования расплава глины размягчаются, переходя в т.н. пиропластическое состояние, что делает возможным под действием выделяющихся газов вспучивание гранул. При этом важным является обеспечение необходимого интервала вспучивания сырьевой массы – разности между температурой начала оплавления поверхности гранул и их вспучивания.

Вспучиваемость сырья характеризуют коэффициентом вспучивания:

$$K_v = V_k / V_c, \quad (7.19)$$

где  $V_k$  – объем вспученной гранулы керамзита;  $V_c$  – объем сухой гранулы до обжига.

Как правило, коэффициент вспучивания глинистого сырья, пригодного для производства керамзита составляет 2-4.

Вспучиваемость глин определяется их химико-минералогическим составом. Наиболее целесообразно использовать монтмориллонитовые и гидрослюдистые глины, содержащие не более 30% кварца, общее содержание  $\text{SiO}_2$ , не должно превышать 70%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – от 10 до 25%,  $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$  – от 2,5 до 12%,  $\text{CaO}$  – не более 6%,  $\text{MgO}$  – не более 4%,  $\text{SO}_3$  – не более 1,5%, органических примесей – не более 3%.

Технология производства керамзита включает переработку исходного сырья и получения гранул, сушку и обжиг гранул, их классификацию и, при необходимости, частичное дробление.

К разновидностям керамзита относят *шунгизитовый гравий* и *глинозольный керамзит*, получаемые обжигом со вспучиванием гранул из глинистых пород, шунгизитосодержащих сланцев, трепелов, золошлаковой смеси или золы-уноса тепловых электростанций; *термолит*, получаемый при обжиге без вспучивания щебня или специально подготовленных гранул из кремнеземистых пород (диатомита, трепела, опок и др.).



*Аглопорит* получают спеканием (агломерацией) глинистых или песчано-глинистых пород, а также отходов, образуемых при добыче, обогащении и сжигании твердого топлива. В качестве добавок в сырьевую смесь применяют каменный или бурый уголь, древесные опилки, лигнин. После агломерации глыбы материала дробят и рассеивают на фракции щебня и песка.

Пористые гравий и щебень изготавливают фракций: 5-10, 10-20 и 20-40 мм. Песок подразделяют на три группы: для конструкционно-теплоизоляционного, конструкционного и теплоизоляционного бетона. В зависимости от насыпной плотности пористые заполнители подразделяют на марки: 250-1100. Предельные значения марок по насыпной плотности для различных видов пористых заполнителей приведены в табл. 7.9.

Таблица 7.9

Марки пористых заполнителей по насыпной плотности

| Наименование заполнителя          | Минимальная марка | Максимальная марка |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------|
| Гравий и щебень керамзитовый      | 250               | 600                |
| Гравий шунгизитовый               | 400               | 700                |
| Гравий аглопоритовый              | 500               | 900                |
| Щебень аглопоритовый              | 400               | 900                |
| Песок керамзитовый и шунгизитовый | 500               | 1000               |
| Песок аглопоритовый               | 600               | 1100               |

Для пористых заполнителей, как и для плотных, нормируется зерновой состав, содержание вредных примесей, а также устанавливается марка по прочности при сдавливании в цилиндре.

Для эксплуатации при воздействии высоких температур предназначены керамические огнеупорные материалы.

*Огнеупоры* – материалы, предназначенные для эксплуатации при воздействии высоких температур. Для огнеупорных материалов температура размягчения, характеризующая огнеупорность, составляет 1580-1770°C, высокоогнеупорных – 1770-2000°C, особо высокой огнеупорности – свыше 2000°C. Изменяют огнеупорность по температуре размягчения специально

изготовленных из керамической массы пироскопов, имеющих форму треугольной срезанной пирамиды, с помощью оптических и электрических пирометров.

Характерными огнеупорными материалами являются дины, кварцевые, полукислые и шамотные огнеупоры. Они отличаются исходным сырьем, способом изготовления и свойствами. *Динасовые огнеупоры* получают обжигом кремнеземистых пород, как правило, на известковой, а полукислые – на глиняной связке. *Кварцевые огнеупоры* изготавливают плавлением природного кварца, *полукислые* получают обычно из смеси огнеупорной глины и молотого кварца или кварцита (возможно применение глины или каолинов), *шамотные* – обжигом огнеупорных глины.

Особенностями динасовых огнеупоров являются низкие термостойкость и стойкость против воздействия большинства шлаков. Для футеровки топок их не используют, а применяют для сооружения стекловарильных, сталеплавильных, коксовых и других печей.

В отличие от динасовых, кварцевые огнеупоры характеризуются высокой термостойкостью, их применяют в печах для варки стекол и др.

Полукислые и шамотные огнеупоры применяют для футеровки шахтных и туннельных печей, вагранок, вращающихся печей, дымоходов и т.п.

Из огнеупорных материалов широко применяют глиноземистые, доломитовые, хромитовые, карборундовые огнеупоры; высокой огнеупорности – магнезитовые, хромомагнезитовые, циркониевые, графитовые. Наибольшую огнеупорность и другие ценные свойства имеют огнеупоры из чистых оксидов и некислородных соединений – нитридов, боридов, карбидов, силицидов и т.п.

Огнеупорные керамические материалы изготавливают в виде изделий различной формы и размеров (прямого, торцевого и ребристого клина, трапециевидной формы и др.).

В строительстве находят широкое применение керамические трубы.

Керамические *дренажные трубы* – материалы для устройства закрытого дренажа – системы водоотвода из переувлажненных и заболоченных земель. Применяют дренажные трубы ци-

линдрической формы с внутренним диаметром 50-300 мм при толщине стенок соответственно 11-27 мм и длине 333-500 мм. Выпускают также трубы с шестью- и восьмигранными внешними поверхностями (рис. 7.17).

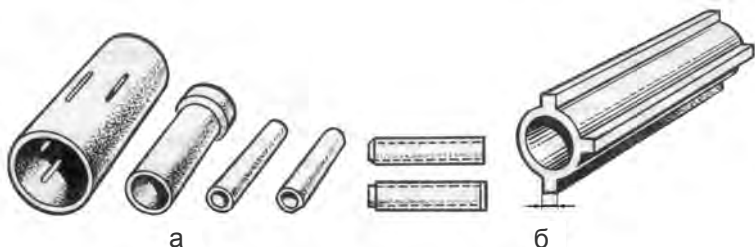


**Рис. 7.17.** Керамические дренажные трубы:  
а – круглые; б – с выступами

Для соединения труб встык их торцы должны быть перпендикулярными к продольной оси и не иметь сколов и вмятин больше, чем на одну треть стенки. Дренажные трубы выпускают неглазурованными и глазурованными, с гладкой внутренней поверхностью, водопоглощением 12-18% и морозостойкостью не менее 15 циклов. При испытаниях трубы должны выдерживать без разрушения внешнюю нагрузку в зависимости от диаметра 3,5-6,0 КН.

Эффективность дренажной трубы определяется количеством воды, отводимой ею за единицу времени.

*Керамические канализационные трубы* – трубы, предназначенные для строительства безнапорных сетей канализации, по которым транспортируются промышленные, бытовые и дождевые сточные воды. Трубы изготавливают из тугоплавких или огнеупорных глин (ГОСТ 286-82).

В отличие от дренажных канализационные трубы относятся к плотной спекшейся керамике. Их выпускают в виде полых цилиндров с раструбом (рис. 7.18), с внутренним диаметром ствола 150-600 мм и длиной 1000-1500 мм. Раструб трубы имеет внутренний диаметр 224-734 мм, глубину 60-70 мм. Для лучшей герметичности стыков каждая труба имеет резьбу – не менее пяти витков на внешней стороне конца трубы и столько же на внутренней стороне раструба. Номинальная толщина стенок ствола и раструба 19-41 мм. Для повышения водонепроницае-

мости и химической стойкости, а также уменьшения сопротивления протеканию жидкостей канализационные трубы покрывают снаружи и внутри глазурью.

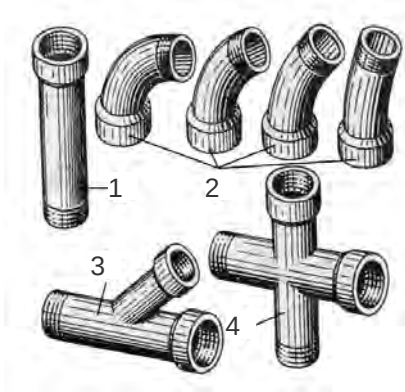


**Рис. 7.18.** Керамическая канализационная труба и детали:

- 1 – труба; 2 – колена;  
3 – тройник; 4 – крестовина

Основные качественные показатели канализационных труб: допустимая внешняя нагрузка 20-30 кН на 1 м; гидравлическое давление не менее 0,15 МПа, водопоглощение труб не должно быть более 8%, кислотостойкость – не менее 93%.

В группу специальных входят *кислотостойкие керамические изделия*, применяемые в условиях кислых агрессивных сред. Изготавливают кислотостойкие кирпич, плитки, трубы, фасонные изделия. Изделия характеризуются повы-

шенной плотностью, высокой механической прочностью, газонепроницаемостью. Их основные свойства: предел прочности при сжатии – 15-50 МПа, средняя плотность – 2,1-2,35 г/см<sup>3</sup>, водопоглощение – 3-10%, термостойкость – 2-10 теплосмен, кислотостойкость – 92-98%.

Сырьем для кислотостойких керамических изделий служат пластичные глины без примесей карбонатов, серного колчедана, гипса.

## 8. СТЕКЛО И СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Стекло также как и керамика относится к материалам с многовековой историей и вместе с тем наиболее широко применяемым в современном строительстве. К *стеклообразным веществам* относят твердые некристаллические вещества, образовавшиеся в результате охлаждения жидкостей при условиях достаточных для предотвращения их кристаллизации. Жидкостями могут быть расплавы, водные растворы солей, полимеры и др. Процесс перехода из жидкого состояния в стекловидное является обратимым.

*Строительное стекло* получают из силикатных расплавов, способных при быстром охлаждении переходить в стеклообразное состояние, для которого характерны изотропность свойств, отсутствие определенной температуры плавления и непрерывное изменение свойств при нагревании с переходом в капельножидкое состояние.

*Стеклокристаллические материалы* – ситаллы – состоят из кристаллических фаз равномерно распределенных в стекле.

### 8.1. Силикатные расплавы и стеклообразное состояние

**Силикатные расплавы.** Силикатные расплавы – гетерогенные минеральные системы, представленные преимущественно силикатами, переведенными при нагревании в жидкое состояние.

Главные оксиды, образующие расплавы, оксиды  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  склонны к комплексообразованию. Они образуют структурные тетраэдры при координационном числе  $n = 4$  для  $\text{Si}^{4+}$  и  $\text{Al}^{3+}$ , тетраэдры соединяются друг с другом через общие кислородные вершины. Степень комплексообразования зависит от атомарного отношения  $\text{O}:\text{Si}$  и от величины энергии взаимодействия катионов металлов с  $\text{O}^{2-}$ . С уменьшением величины  $\text{O}:\text{Si}$  увеличивается число кислородных вершин тетраэдра  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ , общих с вершинами соседних тетраэдров.

Повышение основности расплава путем введения щелочных оксидов сопровождается дроблением комплексов  $\text{SiO}_2$ . При температурах выше линий ликвидуса на диаграммах состояния оксидных

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

систем структурные группы расплава претерпевают флуктуации, т.е. ближний порядок то нарушается от распада групп, то восстанавливается. По мере остывания расплава, чем ближе к температуре ликвидуса, тем больше упорядоченность структурных групп и их размеры.

Вязкость расплава тем выше, чем крупнее в нем структурные комплексы и больше их число. Щелочные катионы снижают вязкость, способствуют дроблению комплексов  $\text{SiO}_2$ . Замена катиона натрия на более сильные двухвалентные катионы повышает вязкость в результате роста указанных комплексов.

Если охлаждать расплав, то по мере приближения к температуре кристаллизации он все больше приобретает сходство с кристаллическим телом. Закономерности расположения центров колебания частиц в решетках кристаллов, обнаруживаемые на любых больших расстояниях, называются *дальним порядком*. Кроме того, существует *ближний порядок*, т.е. закономерность расположения около каждой частицы других частиц ближайшего ее окружения, например, противоположно ей заряженных ионов. При расплавлении кристаллов дальний порядок исчезает, а ближний порядок сохраняется, напоминая ближний порядок в кристалле. Согласно Я.И. Френкелю, при высокой температуре дальний порядок нарушается тепловыми колебаниями атомов и ионов, а также усилением внутренней их диффузии. При охлаждении расплав легко переходит в стеклообразное состояние, если перегруппировка ионов для образования кристаллических зародышей сопряжена со значительным энергетическим барьером.

Кристаллизацию тормозят и замедляют:

- большие размеры структурных ассоциаций в расплаве и низкий их коэффициент диффузии;
- склонность расплава к переохлаждению, когда фазы образования центров кристаллизации и максимальной линейной скорости роста кристаллов не совпадают.

Чем меньше величина числа возникающих центров кристаллизации и линейной скорости роста кристаллов, тем легче достигается и устойчивее стеклообразное состояние вещества.

Одним из главных свойств расплава, влияющим на его способность переходить в стеклообразное состояние, является вязкость. Из жидкого состояния в твердое кристаллическое переходят при осты-

вании расплавы со сравнительно малой вязкостью, медленно возрастающей при охлаждении вплоть до момента кристаллизации. Для стеклообразующих расплавов при температуре плавления характерны высокие значения вязкости. Так, если при температуре плавления Fe – 1535°C динамическая вязкость расплава  $\eta=0,007$  Па·с, то для SiO<sub>2</sub> при 1713°  $\eta=10^{6,7}$  Па·с.

Наряду с вязкостью важной технологической характеристикой расплава является его поверхностное натяжение, под ним понимают работу, которую необходимо затратить на образование единицы поверхности раздела фаз. При нагревании стекольных шихт сначала происходит быстрое снижение поверхностного натяжения, а затем после размягчения и расплавления изменение  $\sigma$  становится значительно более замедленным.

**Стеклообразное состояние.** Под стеклообразным понимают твердое метастабильное состояние вещества, в котором нет кристаллической решетки а элементы кристаллизации наблюдаются лишь для “ближнего порядка”. Стеклообразное состояние занимает промежуточное положение между кристаллическим и жидким.

В настоящее время известен ряд гипотез, которые объясняют стеклообразное состояние вещества. Наибольшее признание получили кристаллитная гипотеза и гипотеза непрерывной беспорядочной сетки.

*Кристаллитная гипотеза* была сформулирована А.А. Лебедевым в 1921 г. До нее существовали представления о стекле как о полностью аморфной переохлажденной жидкости. Согласно этой гипотезе, стекло имеет упорядоченные области субмикронных размеров – *кристаллиты*. Кристаллиты сложены из тетраэдров [SiO<sub>4</sub>] и полиэдров [MeO<sub>n</sub>], их размеры находятся в пределах (15...25)·10<sup>-10</sup> м. Они могут увеличиваться в подходящих температурных условиях и кристаллизоваться. Аморфные прослойки связывают кристаллиты в единое целое. Гипотеза Лебедева получила свое развитие в работах многих ученых (Евстропьев, Флоринская, Матосси, Герловин и др.).

В подтверждение кристаллитной гипотезы приводится изменение показателя преломления стекла в интервале 520-595°C, что связывается с полиморфными переходами микрокристаллов кварца. Кристаллитная гипотеза позволяет объяснить многие процессы образования ситаллов. Спектральные кривые, полученные при изучении инфракрасных спектров поглощения и отражения стекол, сход-

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

ны с аналогичными кривыми соответствующих кристаллов и имеют размытые максимумы.

Хотя не все положения кристаллитной гипотезы можно считать полностью экспериментально доказанными, работы последнего времени доказывают реальность ее центральной идеи.

Автор *гипотезы беспорядочной сетки* американский исследователь В.Х. Захариасен выдвинул ее в 1932 году. Он рассматривал стекло как сплошную атомную трехмерную сетку, лишенную симметрии и периодичности (рис. 8.1). Эта сетка, по Захариасену, представляет собой бесконечно большую элементарную ячейку, в узлах которой расположены атомы или ионы.

В кварцевом стекле структурным элементом является кремнекислородный тетраэдр так же как в кристаллическом кварце. Закономерная ориентация тетраэдров в кристалле кварца нарушается при его превращении в кварцевое стекло.

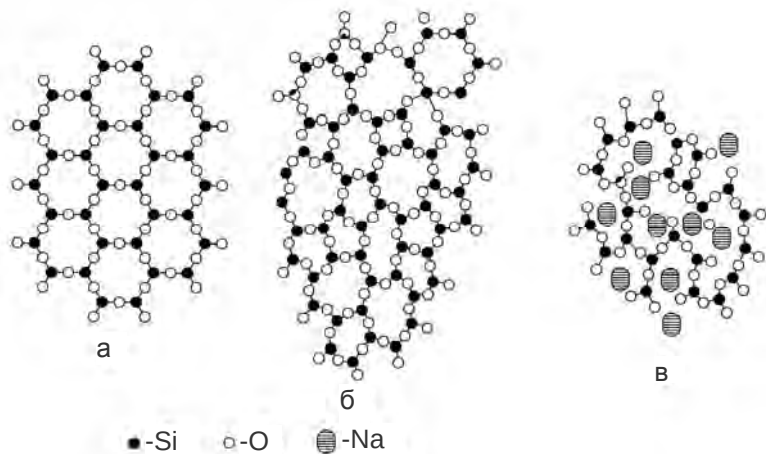


**Рис. 8.1.** Схемы структурных решеток кристаллического кремнезема (а), кварцевого (б) и натрий-силикатного (в) стекол

Стекла более сложного состава, по Захариасену, имеют в основе тот же структурный элемент – кислородный полиэдр, в центре которого находится стеклообразующий катион кремния, бора, фосфора и др. Отличие сложных стекол, например натрийсиликатных, состоит в том, что катионы-модификаторы размещаются в октаэдрических пустотах между кремнийкислородными тетраэдрами (рис.



8.1). Их расположение носит статистический характер и они вызывают разрыв связей  $\text{-Si-O-Si-}$ , обеспечивающих непрерывность структурной сетки, с образованием связей  $\text{-Si-O-Me}$  между тетраэдрами. По мере увеличения количества модификатора растет число разрывов связей между тетраэдрами. Результатом такого дробления структурной сетки является ослабление всех свойств системы – понижаются температура размягчения, вязкость, химическая стойкость стекла.

Гипотеза В.Х. Захариасена оказалась не в состоянии объяснить многие экспериментальные факты, установленные позднее. Наименее убедительным оказалось утверждение Захариасена о химической однородности многокомпонентных стекол.

Наряду с рассмотренными выше основными гипотезами предложены и другие. Например, в соответствии с *агрегативной гипотезой* О.К. Ботвинкина у каждой жидкости, которая может, переходить в стеклообразное состояние всегда, существуют мгновенно возникающие группировки сложных анионов или агрегаты. Величина их примерно 0,10-0,13 нм. Беспорядочные сочетания таких агрегатов и составляют каркас стекла. *Полимерная гипотеза* В.В. Тарасова считает основной особенностью силикатного стекла наличие прочного кремнекислородного каркаса и катионов-модификаторов.

Большинство современных исследователей придерживается *полимерно-кристаллитной гипотезы* строения стекла, которая считает, что стекло является полимерным образованием в виде непрерывной пространственной сетки с различной степенью упорядоченности в расположении атомов, причем кристаллитами являются области с максимальной упорядоченностью.

## 8.2. Виды стекол. Свойства строительного стекла

**Виды и состав стекла.** Стекла классифицируют в зависимости от состава и назначения.

По составу различают оксидные, халькогенидные (халькогениды –  $\text{As}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Te}_2\text{Se}$  и галогенидные ( $\text{BeF}_2$ ) стекла. В наиболее многочисленную группу *оксидных стекол* входят силикатные (кварцевые), алюмосиликатные, боросиликатные, алюмофосфатные и др. стекла, название которых определяется стеклообразующими окси-

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

дами. Главными стеклообразующими оксидами являются  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$ , а также  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , если  $\text{Al}^{3+}$  находится в координации  $[\text{AlO}_4]$  и, сочетаясь с катионом какого-либо из главных стеклообразователей, структурно замещает его.

По В.Х. Захариасену стекло могут образовывать оксиды типа  $\text{Me}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MeO}_2$ ,  $\text{Me}_2\text{O}_5$  (Me – атомы металлов), если кислород создает вокруг катиона треугольник или тетраэдр. Это возможно если радиус катиона не превышает  $0,55 \cdot 10^{-10}$  м. Указанные выше главные стеклообразующие оксиды отвечают этому требованию. Вместе с тем в настоящее время получены стекла из оксидов с катионами, радиус которых больше  $0,55 \cdot 10^{-10}$  м ( $\text{V}^{5+}$ ,  $\text{Mn}^{6+}$ ,  $\text{Te}^{4+}$ ,  $\text{Ta}^{5+}$  и др.).

Наряду с критерием Захариасена предложен ряд других критериев оценки склонности оксидов к стеклообразованию. Так, Н.Винтер-Клейн связывает способность атомов образовывать стекла с конфигурацией их внешней электронной оболочки. Все элементы-стеклообразователи имеют во внешней оболочке р-электроны, при этом отношение суммы р-электронов к сумме атомов должно быть больше 2. Установлено, что стекла могут давать соединения с химической связью смешанного типа (ионоковалентной или др.).

В строительстве применяют в основном силикатные и алюмосиликатные стекла, часто объединяемые в одну группу – *силикатных стекол*, учитывая, что в их составе преобладает  $\text{SiO}_2$ . К силикатным относится подавляющее большинство промышленных стекол. Фосфатные стекольные расплавы применяют в основном для производства оптических, электровакуумных стекол, боратные – для специальных видов стекол (рентгенопрозрачных, реакторных и др.). Смешанные боросиликатные стекла применяют для изготовления оптических и термически стойких стеклоизделий.

В состав многих стекол для регулирования свойств вводят оксиды лития, калия, натрия, бериллия, кальция, магния, стронция и других элементов.

Химический состав строительного стекла находится в пределах (%):  $\text{SiO}_2$  – 71,5-72,5,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 1,5-2,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 13-15,  $\text{CaO}$  – 6,5-9,  $\text{MqO}$  – 3,8-4,3. Для регулирования технологических и строительных свойств стекла в его состав вводят и другие оксиды.

Основной компонент стекла – кремнезем вводится в стекольную шихту с кварцевым песком, молотым кварцитом или песчаником.

Глинозем вводится в виде полевых шпатов, каолина, оксид натрия - соды и сульфата натрия, а оксид калия – в виде поташа и калиевой селитры. Оксид натрия ускоряет процесс стеклообразования, понижая температуру плавления и облегчая осветление стекломассы, но повышает коэффициент теплового расширения и уменьшает химическую стойкость. Оксид калия снижает склонность стекла к кристаллизации, придает ему блеск и улучшает светопропускание. Оксиды кальция и магния обеспечиваются в стекольной шихте различными разновидностями природных карбонатов кальция и магния. Эти оксиды повышают химическую стойкость стекла, а MgO – снижает также склонность стекла к кристаллизации.

Борный ангидрид в шихту вводится с бурой и борной кислотой. Он увеличивает скорость варки, способствует осветлению стекла, повышает термическую и химическую стойкость, уменьшает склонность к кристаллизации и снижает коэффициент термического расширения.

Основное требование ко всем видам исходного сырья – отсутствие примесей и однородность по содержанию основного оксида. Наряду с основными в стекольную шихту вводятся различные вспомогательные сырьевые материалы: осветлители, глушители, красители. Осветлители способствуют удалению из стекломассы газовых пузырей (хлориды и сульфаты натрия, плавиковый шпат). В качестве глушителей, применяемых для получения непрозрачных стекол, используют соединения фтора и фосфора, иногда сурьмы и олова. Красители для стекла разделяют на молекулярные, растворяющиеся в стекломассе, и коллоидные, диспергируемые в виде коллоидных частиц. К первым относят соединения кобальта (синий цвет), хрома (зеленый), марганца (фиолетовый), урана (желтый), железа (коричневые и сине-зеленые тона), а ко вторым – золото (рубиновый), серебро (золотисто-желтый), селен (розовый) и др.

**Физико-механические свойства.** Ряд физико-механических свойств стекла рассчитывают по аддитивным формулам, предполагающим учет долевого участия в синтезе свойств отдельных оксидов. Такие формулы имеют вид:

$$P = \sum P_i m_i, \quad (8.1)$$

где  $P$  – свойство стекла;  $P_i$  – коэффициент долевого участия;  $m_i$  – содержание  $i$ -го оксида в мас. %.

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

Расчетные значения показателей свойств являются усредненными, их необходимо корректировать с учетом особенностей технологии, способа обработки.

*Плотность* строительного стекла в зависимости от состава колеблется в интервале 2,47...2,56, плотность пеностекла 0,15...0,80 г/см<sup>3</sup>. Наименьшую плотность имеют стекла с повышенным содержанием В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>. Наивысшую плотность придают стеклам оксиды тяжелых элементов PbO, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ThO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub> и др. Плотность стекол уменьшается с повышением температуры. Для закаленных стекол плотность всегда меньше чем у исходных отожженных стекол.

Теоретическая *прочность* силикатных стекол при сжатии равна 7000-12000 МПа, кварцевого – 1200-2500 МПа, фактическая 500-800 МПа. Столь значительное различие объясняется наличием на поверхности стекла и в его объеме царапин, включений и неоднородностей.

С уменьшением размера образцов и диаметра стеклянных волокон уменьшается влияние дефектов, и прочность стекла растет. Этот эффект масштабного фактора следует из статистической теории прочности, в соответствии с которой при увеличении размеров образцов возрастает вероятность появления в них опасных дефектов и микронапряжений. Им объясняется более низкая прочность массивных стеклоизделий по сравнению с прочностью изделий, полученных вытягиванием. В табл. 8.1 приведены значения прочности образцов стекла вертикального вытягивания в зависимости от его толщины.

Таблица 8.1

Зависимость прочности от толщины стекла

| Прочность в МПа                    | Толщина стекла, мм |     |    |    |    |
|------------------------------------|--------------------|-----|----|----|----|
|                                    | 2                  | 4   | 6  | 7  | 8  |
| При поперечном изгибе              | 49                 | 49  | 50 | 52 | 53 |
| При центрально-симметричном изгибе | 155                | 100 | 80 | 70 | 65 |

Остаточные напряжения в стекле в значительной мере устраняются путем *отжига* – термической обработки материала, заключающейся в его нагреве до определенной температуры, выдержке и медленном охлаждении.

Снижение прочности стекла вызывают характерные дефекты, обусловленные недостаточной однородностью стекломассы, нарушениями технологических параметров. Особенно опасны свиля, находящиеся в состоянии растяжения и расположенные на поверхности изделий.

Для стекла характерно влияние “усталости”, обусловленное длительным воздействием нагрузок. Безопасная длительная нагрузка для стекла с учетом усталости принимается значительно ниже расчетной.

Развитию микротрещин способствуют поверхностно-активные среды и прежде всего вода. Влияние среды возрастает с увеличением длительности контактирования, температуры, величины прикладываемого напряжения. Установлено, например, если прочность стекла на воздухе составляет 5,3 МПа, то в воде при 20°C она снижается до 4,2 МПа, а при повышении температуры воды до 80°C до 3,9 МПа. Наименьшую прочность щелочно-силикатное стекло имеет при 200°. Кроме поверхностно-активного действия при повышенных температурах влага оказывает на стекло и химическое воздействие. Негативно сказывается при этом также необратимая деформация стекла. В то же время при определенных условиях вода может повышать прочность стекла. Так, при обработке стекла в автоклаве при давлении 5 МПа в течение 24 ч прочность увеличивается почти на 300%. Увеличение прочности стекла отмечается также при воздействии таких газов как  $\text{SO}_3$  и  $\text{CO}_2$ .

Определенное влияние на прочность стекла оказывает его химический состав, хотя это влияние и не столь значительное как состояние поверхности и наличие на ней дефектов. К оксидам, увеличивающим прочность, относятся  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ . Понижают прочность щелочные оксиды,  $\text{PbO}$ . Особенно существенно влияние химического состава на прочность стеклянных волокон и стекол с бездефектной поверхностью. Для них по правилу аддитивности с достаточной для практических целей точностью (около 25...30%) можно рассчитать прочность, исходя из химического состава. При этом принимают следующие удельные прочностные коэффициенты (на 1% оксида по массе):  $\text{SiO}_2 - 1,23$ ;  $\text{B}_2\text{O}_3 - 0,9$ ;  $\text{P}_2\text{O}_5 - 0,76$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 1$ ;  $\text{CaO} - 0,2$ ;  $\text{MgO} - 1,1$ ;  $\text{BaO} - 0,62$ ;  $\text{ZnO} - 0,6$ ;  $\text{PbO} - 0,48$ ;  $\text{Na}_2\text{O} - 0,6$ ;  $\text{K}_2\text{O} - 0,05$ .

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

*Твердость* стекла характеризует способность его поверхности сопротивляться проникновению других тел, не приобретающих при этом остаточных деформаций. Твердость стекла, т.е. прочность его при вдавливании как и другие виды прочности зависит от химического состава (рис. 8.2) и состояния поверхности. Наибольшую твердость имеет кварцевое стекло. К твердым относятся также стекла с содержанием борного ангидрида до 10...12%. Меньшую твердость имеют стекла с большим содержанием щелочных оксидов. Наиболее мягкими являются многосвинцовые стекла.

Твердость стекла характеризует его износоустойчивость, от него зависят скорость и режим процессов шлифования, полирования, сверления и резания стекла. Значения твердости стекол колеблются в пределах  $(4...10) \cdot 10^3$  МПа. Одним из наиболее приемлемых способов определения твердости стекла является метод определения микротвердо-

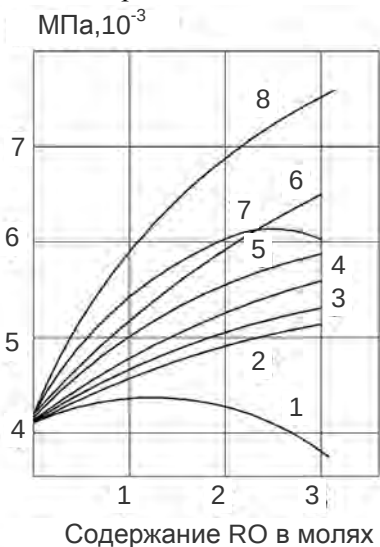


**Рис. 8.2.** Зависимость микротвердости трехкомпонентных силикатных стекол состава  $\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{RO} \cdot 5\text{SiO}_2$  от содержания и природы двухвалентных оксидов:

1 — PbO; 2 — BaO; 3 — CdO; 4 — ZnO;  
5 — SrO; 6 — MgO; 7 — CaO; 8 — BeO

сти путем вдавливания алмазной пирамиды с квадратным основанием при нагрузке не выше 200 г.

Стекла являются типично хрупкими телами. Они практически не способны к пластической деформации и сразу разрушаются после области упругих деформаций по достижении предельной нагрузки. Степень *хрупкости* стекол обычно оценивают ударной вязкостью, которая измеряется работой, отнесенной к поперечному сечению образца, затраченной на ударное разрушение образца. Ударная вязкость силикатных стекол изменяется в пределах  $1,3...2 \cdot 10^3$  Дж/м<sup>2</sup>.

Для оценки хрупкости стекла применяют также показатель хрупкости  $n_x$ , равный отношению предела прочности при сжатии  $R_{сж}$  к работе при ударном разрушении  $A_{уд}$ :

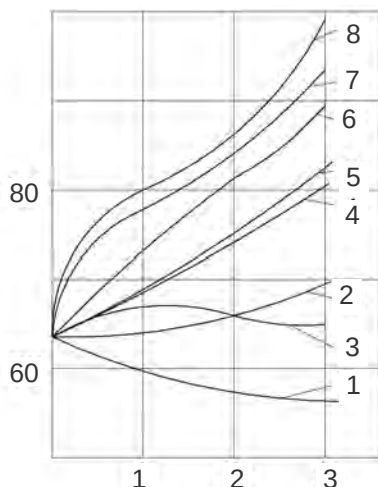
$$n_x = R_{сж} / A_{уд} \quad (8.2)$$

Для различных стекол  $n_x$  изменяется от 10 до 50.

Введение в состав стекла борного ангидрида до 12 мас. % повышает прочность стекла при ударе почти вдвое. Оксиды  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Fe_2O_3$  увеличивают сопротивление удару на 5...20%,  $BaO$  не-

сколько уменьшает хрупкость.

$E \cdot 10^{-3}$ , МПа



Содержание RO в молях

**Рис. 8.3.** Зависимость модуля Юнга для стекол состава  $Na_2O \cdot xRO \cdot 5SiO_2$  от содержания и природы двухвалентных окислов:

- 1 –  $PbO$ ; 2 –  $BaO$ ; 3 –  $CdO$ ;
- 4 –  $ZnO$ ; 5 –  $SrO$ ; 6 –  $MgO$ ;
- 7 –  $CaO$ ; 8 –  $BeO$

Неорганические стекла являются упругими телами, подчиняющимися вплоть до разрушения закону Гука. Значение *модуля упругости* для стекла изменяется в пределах  $(50...120) \cdot 10^3$  МПа. Листовое оконное стекло имеет модуль упругости от  $60 \cdot 10^3$  до  $70 \cdot 10^3$  МПа, кварцевое – от  $71 \cdot 10^3$  до  $74,5 \cdot 10^3$  МПа. По степени влияния на модуль упругости оксиды располагаются в следующем порядке:  $BeO > CaO > MgO > SrO > BaO$  (рис. 8.3). Понижают модуль упругости стекла щелочные оксиды.

Величина *коэффициента Пуассона* ( $\mu$ ), равная отношению поперечной деформации образца (стержня) к его продольной деформации, в зависимости от химического состава для стекла изменяется от 0,11 до 0,3. Для обычного листового стекла  $\mu = 0,22$ .

Существует ряд методов улучшения механических и других свойств стекла: закалка в воздушном потоке и в специальных жидких средах, травление в плавиковой кислоте, ионный обмен, микрокристаллизация поверхностно-

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

го слоя, армирование, триплексование, покрытие стекла пленками и др. При закаливании повышается сопротивление стекол изгибу в 4-5 раз, травлению и покрытию пленками – в 5-10 раз, микрокристаллизации – в 10-15 раз.

*Закалка* стекла заключается в его нагреве до 700-900°C и последующем резком, но равномерном охлаждении. Явление закалки стекла впервые обнаружили в 17 в., но для упрочнения стеклянных изделий в промышленных масштабах его начали использовать в 30-х годах 20 в. В процессе закалки на поверхности стекла возникают равномерно распределенные сжимающие напряжения, повышающие его предел прочности под действием внешних изгибающих или ударных нагрузок. Поверхность стекла охлаждают воздухом или некоторыми органическими, например, кремнийорганическими жидкостями. Используют жидкости с высокой температурой кипения, которые особенно значительно повышают прочность вследствие образования на поверхности стекла прочной пленки (при применении кремнийорганической жидкости – пленки из полимеризованного диоксида кремния). Сравнительная характеристика основных свойств исходных (обожженных) и закаленных листовых стекол приведена в табл. 8.2.

По величине упрочняющего эффекта не уступает закалке способ *травления* поверхности стекла раствором плавиковой кислоты, при котором растворяется ослабленный поверхностный слой. Эффективным является также метод трехстадийной обработки стекла – закаливания в жидкости в условиях ультразвукового поля, травления и затем нанесения защитных покрытий.

При методе ионного обмена в поверхностном слое стекла создаются напряжения сжатия в результате диффузионного замещения ионов  $\text{Na}^+$  щелочными ионами, переходящими из солевого расплава.

**Термические и электрические свойства.** Удельная *теплоемкость* силикатных стекол в интервале температур от 0 до 100°C в зависимости от состава колеблется от 0,3 до 1,05 кДж/(кг°C). С увеличением температуры теплоемкость стекол возрастает при 500°C, ориентировочно составляя 1,09 кДж/(кг°C), при 700°C – 1,27 кДж/(кг°C).

При эксплуатации стекла и в процессе его получения важное значение имеют процессы теплопередачи. Они в значительной мере



определяются *теплопроводностью* т.е. способностью стекла передавать тепловую энергию в направлении более низких температур. В общем случае теплопроводность  $\lambda$  определяется из уравнения теплового потока:

$$Q = \frac{\lambda S \Delta t}{\delta}, \quad (8.3)$$

где  $S$  – площадь сечения;  $\Delta t$  – разность температур;  $\delta$  – толщина.

Таблица 8.2

Сравнительная характеристика основных свойств исходных (отожженных) и закаленных листовых стекол

| Свойства                                                       | Стекло                                             |                                                           |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                                                                | отожженное                                         | закаленное                                                |
| Прочность на удар                                              | Выдерживает удар шара массой 800 г с высоты 150 мм | Выдерживает удар шара массой 800 г с высоты более 1200 мм |
| Предел прочности при изгибе в МПа                              | До 50                                              | До 250                                                    |
| Упругость                                                      | -                                                  | Стрела прогиба в 4...5 раз больше чем у отожженных        |
| Термостойкость в $^{\circ}\text{C}$                            | 60...70                                            | До 175                                                    |
| Электропроводность                                             | -                                                  | В 2-3 раза выше, чем у отожженного                        |
| Плотность в $\text{гсм}^3$                                     | 2,5                                                | Незначительно понижается                                  |
| Коэффициент линейного расширения $10^{-7}, 1/^{\circ}\text{C}$ | 88...95                                            | Увеличивается незначительно                               |

В интервале температур от 0 до  $100^{\circ}\text{C}$  теплопроводность стекла в зависимости от состава составляет от 0,6 до  $1,34 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$ . Наибольшей теплопроводностью обладает кварцевое стекло ( $1,34 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$ ). Для строительного листового стекла она составляет  $0,87 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$ . Повышенную теплопроводность имеют стекла с большим количеством  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$ . Стекла, содержащие много  $\text{PbO}$  или  $\text{BaO}$ , имеют низкую теплопроводность. Чем меньше теп-

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

лопроводность стекла, тем оно менее теплостойко, однако более восприимчиво к закалке. С ростом температуры значение  $\lambda$  увеличивается, однако степень этого увеличения тем меньше, чем выше температура. При температурах выше  $600\ldots 800^\circ$  теплопроводность стекла начинает резко возрастать в результате пропускания им лучистой энергии.

*Расширение* стекла при нагревании характеризуют линейным ( $\alpha$ ) или объемным ( $\beta$ ) коэффициентами теплового расширения (к.т.р.) определяющими соответственно увеличение длины или объема при нагревании стекла на  $1^\circ$ . В практических расчетах принимают  $\beta=3\alpha$ . Коэффициенты теплового расширения стекла, как и других твердых тел, зависят от температуры (рис. 8.4) и обычно для определенного температурного интервала указываются средние их значения. Коэффициент линейного расширения различных видов стекла колеб-

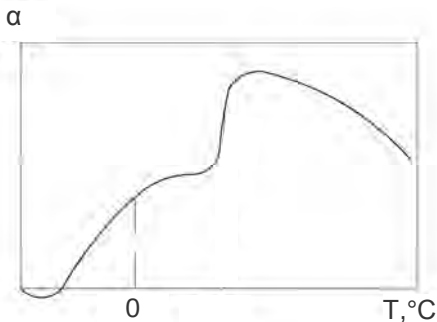


**Рис. 8.4.** Общий характер температурной зависимости к.т.р. стекол

лется в очень широких пределах: от  $5 \cdot 10^{-7}$  до  $120 \cdot 10^{-7}$  1/град (в интервале температур  $15\text{-}100^\circ\text{C}$ ). В наибольшей степени к.т.р. растет под влиянием щелочных оксидов. Влияние оксидов II группы выражено слабее, а оксидов III группы является неоднозначным. В зависимости от состава стекла меняется координационное состояние элементов и приращение к.т.р. может

меняться от положительных до отрицательных значений.

Наименьшее приращение к.т.р. дают элементы IV группы –  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ . Самый низкий коэффициент термического расширения имеет кварцевое стекло ( $\alpha=5,85 \cdot 10^{-7}$  град $^{-1}$ ). У обычных промышленных стекол к.т.р. более чем в 10 раз выше, чем кварцевого, он колеблется от 70 до  $90 \cdot 10^{-7}$  град $^{-1}$ . Тепловое расширение стекла - одно из наиболее важных его свойств, которое необходимо учитывать в целом ряде случаев его практического применения, например, при спайке стекол с металлами в вакуумной технике, при подборе гла-

зурей и эмалей и др. С коэффициентом термического расширения стекла тесно связана термостойкость стекол.

*Термическая стойкость* стекла характеризует его способность выдерживать без разрушения резкие температуры. Она измеряется температурой, на которую можно внезапно охладить стеклянный образец без его разрушения.

При резком охлаждении стекла вследствие неодинаковой скорости охлаждения в поверхностных слоях возникают напряжения разрыва, во внутренних – сжатия, а при нагревании – наоборот. Учитывая, что разрушение стекла начинается с поверхности и прочность при сжатии во много раз больше прочности при разрыве, резкое охлаждение стеклоизделий более опасно, чем резкое нагревание.

Термическая стойкость различных стекол находится в пределах 90-1000°C. Для листового оконного стекла, например, она не выше 90°, химико-лабораторного – 120-140°C, а кварцевого – 800-1000°C.

Стекло является хорошим диэлектриком. Особенно высокие диэлектрические свойства характерны для бесщелочных баритовых стекол.

*Электропроводность* стекла в сильной степени зависит от температуры. Так, если при обычной температуре электропроводность оконного стекла составляет  $10^{-13}$ - $10^{-14}$ ,  $\text{ом}^{-1}$  то при температуре 1400-1500°C она составляет уже 1,1-0,3  $\text{ом}^{-1}$ . При температуре ниже начала размягчения стекла его электропроводность  $\chi$  изменяется в зависимости от температуры в соответствии с формулой:

$$\chi = Ae^{-\alpha/T}, \quad (8.4)$$

где  $A$  и  $\alpha$  – постоянные, зависящие от химического состава стекла;  $T$  – температура в °К.

В приведенной выше зависимости отражается влияние температуры как на число ионов-переносчиков электричества так и на скорость их перемещения.

На электропроводность стекла большое влияние оказывает его химический и фазовый состав. По мере кристаллизации стекол электропроводность их уменьшается. Для кристаллических натриевых силикатов она в  $10^4$  раз ниже электропроводности соответствующих стекол.

В структурной сетке стекла относительно слабо закреплены щелочные ионы, они оказывают наибольшее влияние на электропроводность. Значительно меньше влияют двухвалентные катионы.

На общую электропроводность стекла влияют как объемная, так и поверхностная проводимость. Образовавшаяся на поверхности стекла в результате его гидролиза пленка геля кремниевой кислоты адсорбирует влагу, которая образует щелочной раствор и обуславливает повышенную электропроводность.

**Оптические свойства.** Оптические свойства стекла характеризуются показателем преломления, коэффициентами пропускания, поглощения и отражения света, а также некоторыми другими параметрами.

Под *показателем преломления* ( $n$ ) любых веществ понимают величину отношения скорости распространения света в вакууме к скорости распространения в данном веществе. Величина показателя преломления обычно уменьшается при увеличении длины волны. Показатели преломления силикатных стекол составляют примерно 1,5...1,9. Изменение скорости распространения света заставляет его луч менять направление при прохождении через поверхность раздела. Если угол падения светового луча  $\alpha$ , а угол преломления  $\beta$ , то они связаны между собой соотношением:

$$n = \sin \alpha / \sin \beta. \quad (8.5)$$

Показатель преломления стекла зависит, главным образом от его плотности: чем выше плотность стекла, тем меньше скорость распространения света. На величину  $n$  влияет также температура, с ее увеличением показатель преломления возрастает.

*Коэффициенты пропускания  $K_{пр}$ , поглощения  $K_{погл}$  и отражения  $K_{отр}$  света стеклом* находятся по формулам:

$$K_{пр} = I_{прош} / I_0; K_{погл} = I_{погл} / I_0; K_{отр} = I_{отр} / I_0; \quad (8.6)$$

где  $I_{прош}$ ,  $I_{погл}$  и  $I_{отр}$  – соответственно величины (интенсивности) светового потока, прошедшего через стекло, поглощенного и отраженного стеклом;  $I_0$  – световой поток, падающий на стекло (рис. 8.5).

Сумма коэффициентов, характеризующих указанные оптические свойства стекла, равна единице:  $K_{пр} + K_{погл} + K_{отр} = 1$ .

Определение пропускания, отражения и поглощения света стеклами проводится с помощью различных типов спектрофотометров. Высокая оптическая прозрачность (коэффициент светопропускания оконного стекла 88,1-91,2%) и способность широко изменять свето-

преломление и светорассеяние, а также поглощение в видимой, ультрафиолетовой, инфракрасной и рентгеновской частях спектра отличают стекло от других твердых тел. Повышенным светопропусканием в инфракрасной области спектра обладает кварцевое стекло, а наиболее высоким – алюмофосфатные стекла. Высокая прозрачность в ультрафиолетовой области свойственна кварцевому, боросиликатным и бороалюмофосфатным стеклам. Стекла с вы-

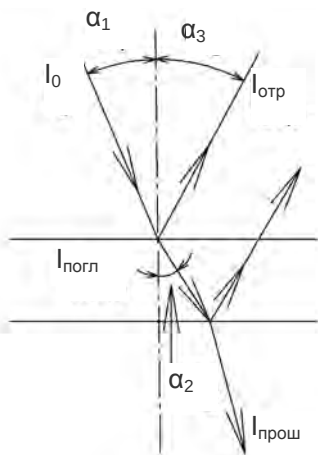


**Рис. 8.5.** Пропускание, преломление и отражение света на поверхности раздела стекло-воздух

соким содержанием оксидов свинца или бария интенсивно поглощают рентгеновские и гамма-лучи, а оксидов кадмия и бора – тепловые нейтроны. Повышенной радиационно-оптической стойкостью отличаются стекла, содержащие оксид церия (до 1,5%).

Цвет стекла зависит от вида красителя, а также валентного и координационного состояния красящего катиона. Красители могут придавать желтую ( $\text{CrO}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), зеленую ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ), синюю ( $\text{CuO}$ ,  $\text{CoO}$ ), фиолетовую ( $\text{NiO}$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ), красно-рубиновую (коллоидные медь или золото) и другие виды окраски стеклу.

Ограниченная прозрачность стекла и его оптическая неоднород-

ность обеспечиваются при глушении стекла, достигаемом присутствием включений кристаллического, аморфного или газообразного происхождения. Эффективными глушителями являются  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{PbAs}_2\text{O}_6$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  и др. Применение глушителя определяется назначением стекла. Если требуются стекла светотехнического назначения, характеризующиеся значительным рассеянием света и минимальным его поглощением, используют как глушители фториды кальция и натрия, показатели преломления которых незначительно отличаются от показателя преломления основного стекла. Для производства глушеных стекол, использующихся как облицовочный материал, в качестве глушителей применяют  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{TiO}_2$ , показатели преломле-

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

---

ния которых значительно отличаются от показателя преломления стеклянной матрицы.

**Химические свойства.** По стойкости к воздействию агрессивных сред стекло превосходит большинство других строительных материалов. Химическая стойкость стекла зависит от состава и состояния поверхности стекла и природы воздействующих на него реагентов.

По механизму воздействия на стекло химические реагенты разделяют на две группы. В первую входят вода, растворы кислот и солей. Под их влиянием из поверхностного слоя стекла удаляются щелочные компоненты, которые переходят в раствор. В результате гидролиза щелочных силикатов на поверхности стекла образуется кремнеземистая пленка, обогащенная труднорастворимыми гидроксидами. Эта кремнеземистая пленка тормозит дальнейшую коррозию и определяет высокую химическую стойкость стекла к реагентам первой группы.

Для многощелочных стекол при длительном воздействии влажной атмосферы возможно помутнение (выветривание). Степень разрушения стекла водой определяется скоростью гидролиза силикатов на его поверхности, а также скоростью диффузии воды и продуктов химического разрушения стекла через защитную кремнеземистую пленку. Если щелочь, образующаяся в результате гидролитического распада силикатов, не удаляется с поверхности стекла, то начинается процесс более глубокого его химического разрушения, что приводит к появлению белых пятен, помутнению и даже отслаиванию стекла.

Наибольшее влияние на повышение водостойкости стекол оказывают оксиды IV группы элементов:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ . Наиболее сильно понижают водостойкость стекла оксиды I группы.

Стекла обычных составов стойки к действию кислот, кроме плавиковой и фосфорной. Интенсивность разрушения стекла в кислотах возрастает по мере уменьшения pH до 1,5 приблизительно пропорционально логарифму концентрации. В очень концентрированных растворах разрушение стекла замедляется. При равных pH по силе агрессивного воздействия растворы разных кислот располагаются в соответствии со значениями констант диссоциации.

Повышение стойкости стекол по отношению к кислотам достигается путем увеличения содержания в них  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (до 25%) или при введении в их состав диоксидов циркония и титана.

Вторая группа реагентов, воздействующих на стекло - растворы гидроксидов и карбонатов щелочных и щелочно-земельных металлов, фосфорная и плавиковая кислоты. Под их действием происходит разрушение кремнекислородного каркаса стекла. При этом защитный слой не образуется, и разрушение стекла идет с постоянной и заметной скоростью. Коррозия силикатных стекол под воздействием реагентов второй группы примерно в 100 раз выше, чем первой. Коррозионное воздействие плавиковой кислоты на стекло используется в технике для травления поверхности стекла с целью его декорирования и полирования.

Стойкость стекол по отношению к щелочам возрастает с повышением содержания в них  $\text{CaO}$ , а также при введении  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{BeO}$ .

К действию плавиковой кислоты сравнительно стойки бесщелочные алюмофосфатные и бороалюмофосфатные стекла, содержащие оксиды бериллия, магния, цинка.

Повышение температуры усиливает коррозию стекла. В интервале до  $100^\circ\text{C}$  при повышении температуры на каждые  $10^\circ$  коррозия ускоряется примерно вдвое.

Значительно улучшать стойкость стекла могут различные поверхностные покрытия. Для повышения химической стойкости стекла используют поверхностную обработку изделий кислотами или растворами некоторых солей с последующим нагреванием до  $400\ldots 450^\circ\text{C}$ . При такой обработке образуется защитная поверхностная кремнеземистая пленка, увеличивающая химическую стойкость стекла в десятки раз.

### 8.3. Строительные изделия из стекла

**Получение изделий из стекла.** Основной продукцией стекольной промышленности является листовое стекло: неполированное, полированное, многослойное, закаленное и др.

Выпускают также разнообразные изделия из стекла, в том числе армированного, профильного, витринного.

Широко применяются разнообразные изделия архитектурно-строительного назначения: стеклянные блоки, стеклопрофилит,

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

---

стеклопакеты. Их используют в качестве эффективных светопрозрачных материалов для наружных и внутренних ограждений в жилых, общественных и промышленных зданиях.

Для облицовки зданий применяют стеклянные коврово-мозаичные плитки, цветные плитки марблит из непрозрачной стекломассы, стемалит – листовое стекло, покрытое с одной стороны керамическими красками, узорчатое и цветное стекло.

Получили распространение стеклянные трубы, стекловолоконистые гидро- и теплоизоляционные материалы.

К прогрессивным композиционным материалам относятся стекла с напыленной на их поверхность тончайшей прозрачной металлической или пластмассовой пленкой; слоистые стекла, склеенные прозрачными синтетическими пленками.

Развивается производство листового и прессованного стеклокристаллического материала – шлакоситалла, профильного стекла коробчатого сечения, цветного армированного профильного стекла, стекла с избирательным светопропусканием для всех диапазонов длин волн, цветного прокатного стекла и других, эффективных в строительстве стеклянных изделий.

**Получение изделий из стекла.** Основные компоненты вводятся в стекольную шихту с песком, полевыми шпатами, содой, известняком, доломитом и другими материалами. Для придания стекломассе необходимых свойств и ускорения варки применяют бой стекла, а также вспомогательные материалы – обесцвечиватели, окислители, восстановители, глушители и др. Сырьевые материалы, применяемые для составления стекольной шихты, подвергают предварительной подготовке. Пески, содержащие повышенное количество оксидов железа, обогащают промывкой в гидроциклонах или другими методами. Высушенные и измельченные компоненты шихты тщательно смешиваются. Для предотвращения расслоения шихту брикетируют или гранулируют и подают в стекловаренные печи.

Наиболее совершенными печами, применяемыми для варки строительных стекол, являются ваннные печи непрерывного действия. В бассейне таких печей может помещаться свыше 2 тыс. т стекломассы. В ваннных печах материал непрерывно передвигается от загрузочного конца печи к выработочному, попадает в зоны различной температуры и превращается в готовую стекломассу. Процесс стекловарения включает пять основных стадий: силикатообра-



зование, стеклообразование, осветление, гомогенизацию и охлаждение до необходимой вязкости.

Выработка стекломассы производится различными методами в зависимости от вида изделий. Листовое стекло получают вертикальным вытягиванием на машинах ВВС (рис. 8.6), прокатом на слое расплавленного металла (рис. 8.7). Последний, так называемый *флоат-способ* является наиболее прогрессивным способом производства полированного стекла.

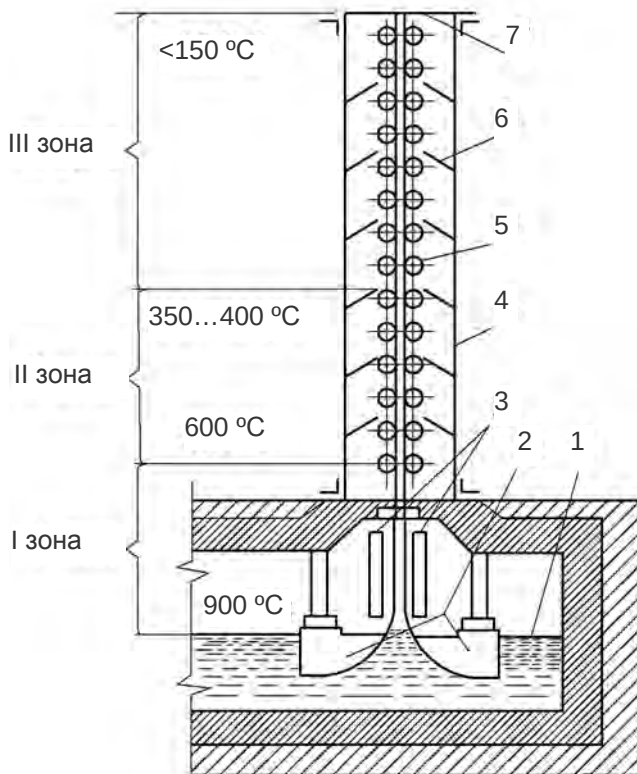


**Рис. 8.6.** Установка для вертикального вытягивания стекла:

- 1 – стекломасса; 2 – челнок; 3 – холодильник; 4 – шахта;
- 5 – валки; 6 – скаты для удаления боя;
- 7 – площадка для отламывания

Сущность его заключается в том, что струя стекломассы непрерывно сливается из бассейна стекловаренной печи на поверхность

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

расплавленного металла, растекается по ней слоем равномерной толщины и превращается в ленту стекла с полированной поверхностью.

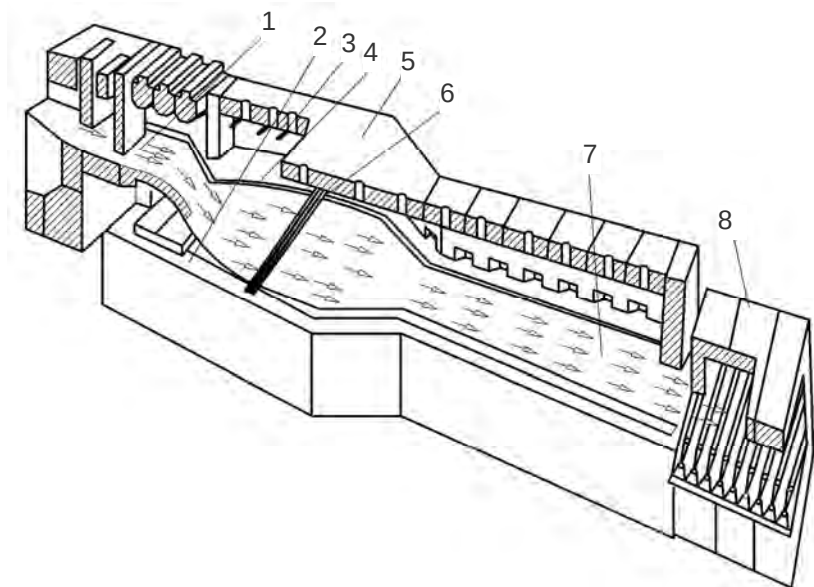


**Рис. 8.7.** Схема изготовления полированного стекла с использованием флоат-способа:

- 1 – стекломасса; 2 – бассейн ванны расплава;  
3 – нагреватели, шиберы; 4 – олово; 5 – свод ванны;  
6 – холодильник; 7 – лента стекла; 8 – печь отжига

Стекланные блоки изготавливают прессованием отдельных полублоков с последующим свариванием их на специальных сварных автоматах. При получении стеклопрофилита стеклянную полосу, изготовленную методом непрерывного горизонтального проката, протягивают через формующее устройство для приобретения необходимого швеллерного или коробчатого сечения. Стеклянные трубы получают на поточных линиях горизонтального или вертикального вытягивания.

Путем модифицирования строительного стекла, введения в его состав катализаторов, красителей или глушителей в сочетании с соответствующими режимами обработки получают эффективные

облицовочные материалы: плиты из авантюринового стекла, глушеные белые и цветные плиты, сигран и т.п. Некоторые облицовочные материалы на основе стекла (стеклокремнезит, стеклокристаллит, порокремнезит, пенодекор, цветную мозаичную плитку) изготавливают спеканием стекла с добавками.

Стекла со специальными свойствами получают регулированием их химического состава и, применяя соответствующие способы обработки в процессе производства. Так, стекло "Метелица" получают на расплаве металла или солей. При этом одна сторона стекла термически полируется, а на другой образуется глубокий рельеф с неповторяющимся узором при чередовании участков с полированной и матовой поверхностью.

Для получения увиолевого стекла, обладающего способностью пропускать не менее 25% ультрафиолетовых лучей, применяют сырьевые материалы с особо высокой степенью чистоты (менее 0,03% оксидов железа). Теплопоглощающее стекло с пониженным светопропусканием длинноволновой части спектра солнечных лучей изготавливают с введением добавок оксидов кобальта, никеля и железа.

Ряд специальных стекол получают при нанесении на поверхность стекла пленок металлов и их оксидов. Пленочные покрытия наносят электрохимической обработкой, химическим осаждением из растворов, катодным распылением, испарением в вакууме. На поверхность стекла наносят также прозрачные пластмассовые пленки, изменяющие частоту собственных колебаний стекол. Такие стекла применяют в звукоизоляционном остеклении.

Большую группу стеклоизделий изготавливают на основе стекловолокна. Стекловолокно получают из бесщелочного алюмоboro-силикатного стекла, щелочного и нейтрального стекол. Переработкой минеральных расплавов и стекломассы получают минеральную и стеклянную вату, которая состоит из коротких стекловидных волокон и обладает высокими теплоизоляционными свойствами.

**Листовое стекло.** Листовое стекло (ГОСТ 111-90) предназначено для остекления светопрозрачных строительных конструкций, средств транспорта, мебели, зеркал и других изделий технического и бытового назначения. Его подразделяют на оконное, витринное, зеркальное и техническое.

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

В соответствии с назначением и регламентированными свойствами стекло подразделяют на марки, указанные в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Марки листового стекла

| Марка стекла   | Толщина стекла | Условное наименование             | Рекомендуемая область применения                                                                                                               |
|----------------|----------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| M <sub>1</sub> | 2,0...6,0      | Зеркальное улучшенное             | Изготовление высококачественных зеркал, встроенных стекол легковых автомобилей                                                                 |
| M <sub>2</sub> | 2,0...6,0      | Зеркальное                        | Изготовление зеркал, безопасных стекол транспортных средств                                                                                    |
| M <sub>3</sub> | 2,0...6,0      | Техническое полированное          | Изготовление декоративных зеркал, изделий для мебели, безопасных стекол транспортных средств                                                   |
| M <sub>4</sub> | 2,0...6,0      | Оконное полированное              | Высококачественное освещение светопрозрачных конструкций, изготовление изделий для мебели, безопасных стекол транспортных средств              |
| M <sub>5</sub> | 2,0...6,0      | Оконное непотированное улучшенное | Остекление светопрозрачных конструкций, изготовление изделий для мебели, безопасных стекол сельскохозяйственных машин и тихоходного транспорта |
| M <sub>6</sub> | 2,0...6,0      | Оконное непотированное            | Остекление светопрозрачных конструкций                                                                                                         |
| M <sub>7</sub> | 6,5...12,0     | Витринное полированное            | Высококачественное освещение витрин, витражей                                                                                                  |
| M <sub>8</sub> | 6,5...12,0     | Витринное непотированное          | Остекление витрин, витражей, фонарей                                                                                                           |

Стекло изготавливают и поставляют с размерами по спецификации потребителя (твердые размеры – ТР). При отсутствии спецификации допускается изготовление и поставка стекол в заводском ассортименте (свободные размеры – СВР).

Максимальная ширина и длина листов стекла должна соответствовать их толщине: для стекла толщиной 2 и 2,5 мм – 1000×1600 мм; 3 и 3,5 мм – 1300×2000 мм; 4-6 мм – 1600×2500 мм; св.6 до 12 мм – 3000×6000 мм. Стандартом для листового стекла нормируются предельные отклонения по толщине и размерам листов, разнотолщинность одного и того же листа, разность длин диагоналей, возможные дефекты (пороки) – пузырьки, посторонние включения и др.

Нормируются также в зависимости от толщины листов и марок стекла коэффициент направленного пропускания света (от 0,75 до 0,89) и возможные оптические искажения.

Величина остаточных внутренних напряжений стекла марок М<sub>5</sub> и М<sub>6</sub> не должна превышать 100 Нм/см.

Справочные физико-механические показатели листового стекла: плотность – 2500 кг/м<sup>3</sup>, прочность на сжатие – 700-900 МПа, растяжение – 30 МПа, изгиб – 15 МПа, теплопроводность – 1,0 Вт/(м°С), температурный коэффициент линейного расширения (в интервале от 20 до 300 °С) –  $9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , теплопоглощающая способность – 720 Дж/(кг°С), температура размягчения 600°С.

Наряду с наиболее массовыми видами листового стекла, рассматриваемыми выше, изготавливают большое количество его специальных видов.

*Стекло армированное листовое* изготавливают методом непрерывного проката с одновременным армированием металлической сеткой. Этот вид стекла имеет повышенную огнестойкость. При его разрушении осколки удерживаются армирующей металлической сеткой. В условиях пожара армированное стекло не дает распространяться огню и дыму в помещениях. Изготавливается оно обычно толщиной 5,5 мм (бесцветное) и 6 мм (цветное).

Поверхность армированного стекла может быть гладкой и блестящей, кованой, рифленой, узорчатой.

Волнистое армированное стекло (рис. 8.7.) жестче плоского; его применяют для застекления больших пролетов. Для армирования стекла применяют сварную или плетеную сетку с шестиугольными

или квадратными ячейками 12,5×12,5, 20×20 и 25×25 мм из термообработанной стальной проволоки диаметром 0,45-0,55 мм.

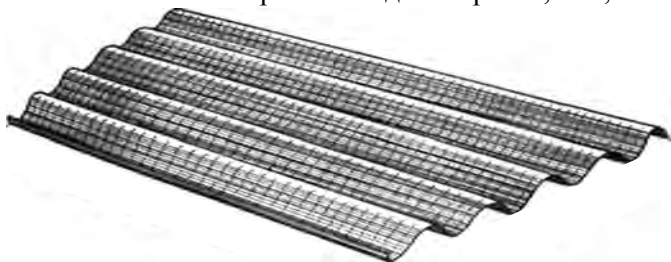


**Рис. 8.7.** Армированное стекло

Армированное стекло, применяемое для ограждения балконов и лоджий, устанавливают в виде экранов, обрамляемых металлической рамкой, или сплошной ленты, прикрывающей балконную плиту.

*Стекло узорчатое* (рис. 8.8) также изготавливают методом непрерывного проката. Оно имеет на одной или обеих поверхностях повторяющийся рельефный узор глубиной 0,5-1,5 мм. Его изготавливают как бесцветным, так и цветным. Для узорчатого стекла свойственны высокие декоративность и светорассеивающая способность. Его использование создает мягкий рассеянный свет внутри помещений, уменьшает уровень проникающей солнечной радиации, частично или целиком исключает сквозную видимость без заметной потери светопрозрачности. Узорчатое стекло может быть как окрашенным в массу, так и окрашенным нанесением оксидно-металлических и других покрытий.

Разновидностью узорчатого стекла являются стекла «Метелица» и «Мороз». *Стекло «Метелица»* может быть бесцветным, цветным, с алюминированной поверхностью, создающей дополнительный декоративный эффект. Одна поверхность стекла - термически полированная, другая имеет неповторяемый узор в виде волнистых участков, выступающих над поверхностью листа.

*Стекло «Мороз»* изготавливают из оконного или витринного непотерянного стекла путем специальной обработки, в результате которой на поверхности образуется узор, напоминающий изморозь.

*Стекло теплопоглощающее* принадлежит к группе солнцезащитных. Солнцезащитные стекла имеют высокую поглощающую

способность по отношению к инфракрасным лучам. Их изготавливают с введением в шихту добавок оксидов кобальта, никеля и железа и др. Эти виды стекла рекомендуется использовать в зданиях с кондиционированным режимом и повышенными требованиями к защите от инфракрасных лучей (музеи, выставочные залы, библиотеки и т.п.), а также в жилых домах с максимальной инсоляцией.

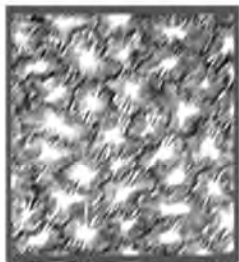
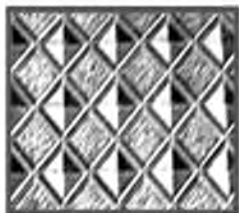


**Рис. 8.8.** Узорчатое стекло

Солнцезащитные стекла выпускают трех видов: окрашенные в массе оксидами или другими соединениями металлов; с пленочными оксидно-металлическими покрытиями; с прозрачными металлическими покрытиями. Такие стекла имеют серо-голубой или зеленовато-голубой цвет различной интенсивности.

Светопроницающая способность теплопоглощающих стекол 65-75%, прохождение инфракрасных лучей – 20-45%. Теплопоглощающие стекла нагреваются на 3-5°C больше обычных и испытывают соответственно большие температурные деформации. В конструкции светового проема стекло должно находиться в свободном состоянии. При размерах листа свыше 150×80 мм используют резиновые прокладки. Теплопоглощающее стекло рекомендуется использовать как внешнее при двойном остеклении с обязательным проветриванием межрамного пространства.

Стекла с пленочными покрытиями принадлежат к *теплозащитным* и *теплоотражающим*. Для теплозащитных стекол используют прозрачные пленки от серо-дымчатого до сине-фиолетового цвета. Интенсивность цвета можно регулировать толщиной слоя покрытия, изменяющейся от 0,3 до 1 мкм. Светопроницаемость теплозащитного стекла составляет 30-70 % независимо от толщины. Теплоотражающее стекло уменьшает потери тепла сквозь оконные проемы и другие виды светопрозрачных ограждений зданий, а также защищает от

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

тепла, излучаемого техническими источниками. Нанесение на стекло теплоотражающей пленки практически не изменяет прозрачности стекла по отношению к солнечной радиации, но значительно уменьшает его способность поглощать длинноволновую радиацию и соответственно лучеиспускательную способность. С уменьшением излучательной способности стекла снижаются потери тепла. Пленочные покрытия имеют свойства светового фильтра. В зависимости от вида покрытия различают *К-стекло* (твердое покрытие) и *Е-стекло* (мягкое покрытие). При нанесении мягкого покрытия на полированное стекло методом ионно-плазменного напыления получают *LOW-E стекло*. Величина излучательной способности простого стекла – 0,83, К-стекла – 0,2, LOW-E – 0,04...1,2.

*Увioletовое стекло* изготавливают из материалов высокой чистоты. Кроме видимой части спектра оно пропускает не менее 25% ультрафиолетовых лучей с длиной волн 260-320 нм. Со временем увioletовое стекло “стареет”, приобретая при этом фиолетовый или желтый цвет, снижается его способность пропускать ультрафиолетовые лучи.

*Термически полированное стекло* выпускают двух видов: *техническое* – для остекления транспортных средств (кроме открытых стекол автомобилей), мебели и строительных сооружений; *зеркальное* – для изготовления изделий, к которым выдвигаются повышенные требования к оптическим показателям.

Зеркальное стекло изготавливают нанесением на тыльную сторону полированного стекла слоя металлического серебра или алюминия и защитного покрытия. Из зеркального стекла изготавливают наряду с зеркалами и различные декоративно-отделочные изделия.

*Стекло плоское закаленное* характеризуется повышенной механической прочностью, термостойкостью и безопасным характером разрушения. Закаливание стекла – термообработка, заключающаяся в его нагреве до температуры 700-900°C с последующим резким, но равномерным охлаждением поверхностного слоя воздухом или жидкостями. Закаленное стекло разделяют на полированное (ЗПП) и неполированное (ЗП), 1- и 2-го сортов. Допустимый при эксплуатации перепад температур – 270°C. Предел прочности при изгибе в 5,5, при сжатии в 1,35 и растяжении в 5,1 раза выше, чем у обычного оконного стекла и достигает 250 МПа.



Закаленное стекло не поддается резанию, сверлению, фрезерованию и другим видам механической обработки.

Закаленное стекло применяют для изготовления дверных полотен, светопроницаемых перегородок, потолков и других строительных элементов, требующих повышенных механической и термической стойкости и безопасности.

*Стемалит* – закаленное эмалированное стекло толщиной 6-12 мм. При изготовлении стемалита, на внутреннюю поверхность стекла наносят керамическую эмаль и листы подвергают термической обработке для закрепления эмали и упрочнения стекла.

Физико-механические свойства стемалита: предел прочности, МПа, при изгибе – 250, при растяжении – 231, термостойкость – 80-90°C; коэффициент линейного термического расширения в интервале температур 20-300°C –  $9 \cdot 10^{-6}$ .

Поверхность стемалита может быть полированной, кованой, узорчатой. Стемалит выпускают разных цветов и оттенков. Его применяют как в виде листов, так и в виде навесных панелей. Стемалит используют для внешней и внутренней облицовки стен и перегородок, а также для ограждений балконов, лоджий и лестничных клеток.

*Многослойное ламинированное стекло – триплекс* (рис. 8.9) состоит из двух или более листов, соединенных между собой прозрачной эластичной прокладкой толщиной 1-3 мм. Триплекс обладает высокой звукоизолирующей способностью, ударной стойкостью и прочностью. При комбинировании различных стекол и пленок достигаются необходимые технические свойства триплекса и его соответствие архитектурным требованиям. При нарушении целостности триплекс остается в раме, а связующая полимерная пленка предотвращает появление острых режущих кромок и осыпание осколков. Толщина триплекса составляет 6-40 мм. Его светопропускающая способность в зависимости от типа и толщины стекла составляет 69-78%, термостойкость – более 100°C, теплостойкость 100-110°C. При установке стекла триплекс в однокамерный стеклопакет, звукоизоляция окна становится сопоставимой со звукоизоляцией двухкамерного стеклопакета. Триплекс ограничивает проникновение в помещение ультрафиолетового облучения.

Изготавливают два вида триплекса – пленочный и заливной. В первом случае слои склеиваются друг с другом по всей поверхности

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

полимерной пленкой, во втором – ламинирующим составом. Пленочный триплекс имеет лучшие оптические характеристики, заливной – прочностные.

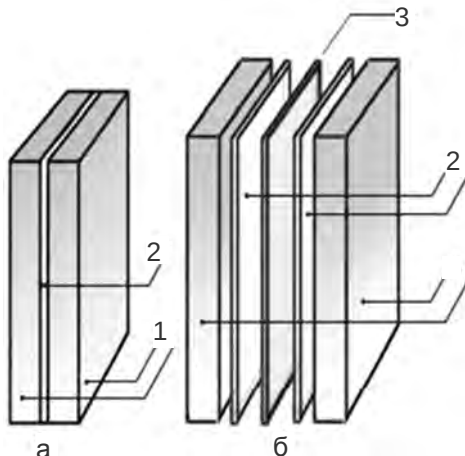


**Рис. 8.9.** Триплекс а – обычный; б – художественный:

1 – стекло; 2 – прозрачная эластичная прокладка;

3 – декоративная пленка

Триплекс применяют в тех случаях, когда стекло должно быть ударопрочным, пуленепробиваемым, огнестойким – при остеклении витрин магазинов, балконов, лестниц, устройства стеклянных полов, для боковых поверхностей эскалаторов, в стеклопакетах, устанавливаемых на крышах зданий и др.

Разновидностью многослойного является *моллированное (гнутое) стекло*. Его получают в печах, медленно нагревая стекло до 600°C. Стекло постепенно приобретает заданную форму и охлаждается.

Благодаря комбинациям из гнутого стекла различных радиусов возможно создание разнообразных конструкций криволинейной формы, изготовление декоративных элементов отделки помещений.

**Изделия для отделки, светопрозрачных ограждений и теплоизоляции.** Из стекла изготавливают разнообразные отделочные строительные изделия: плитку, блоки, профильные изделия, стеклопакеты и др.

*Облицовочные стеклянные плитки* получают прессованием или непрерывным прокатом из глушеной стекломассы или битого стекла. Поверхность обратной стороны плиток делается рифленой для лучшего сцепления с раствором во время облицовки.

Толщина плиток 4; 5; 6 мм, длина и ширина от 50×50 до 150×150 мм. Лицевая поверхность плиток может быть матовой или блестящей, гладкой или с рельефным узором. Их применяют для облицовки производственных помещений, нуждающихся в особой чистоте, помещений торговых заведений и других объектов.

Стеклянными прессованными плитками эффективно облицовывать помещения с повышенной влажностью, находящиеся под действием агрессивных веществ. Плитки можно крепить цементными, полимерцементными растворами и другими водостойкими клеящими материалами.

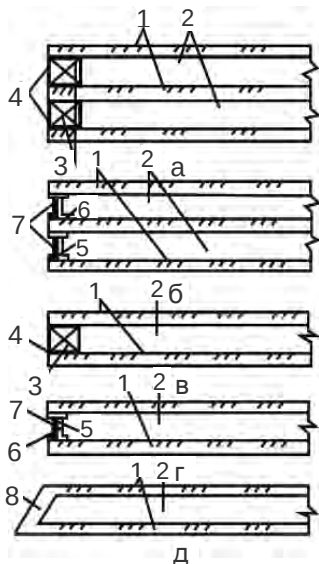


**Рис. 8.10.** Конструкции стеклопакетов: а, в – клееных; б, г – спаянных; д – сварных; 1 – стекло; 2 – воздушная прослойка; 3 – распорочная рамка; 4 – клеящий и герметизирующий слой; 5 – шайба из свинцового сплава; 6 – металлизированный слой на стекле; 7 – место спайки; 8 – узел сварки стекла

*Стеклянные эмалированные плитки* нарезают из листового стекла (обычно используют отходы). Одну из поверхностей покрывают слоем цветной или белой эмали толщиной 0,2-0,3 мм. Тыльная поверхность – шершавая, что обеспечивает надежное сцепление с цементно-песчаным раствором или другими клеящими веществами. Применяют для внутренней облицовки помещений с повышенными санитарно-гигиеническими требованиями. Такие плитки не рекомендуются для применения при воздействии кислот, щелочей, агрессивных газов.

*Клееные стеклопакеты* – изделия обычно из двух или трех плоских стекол, склеенных, спаянных или сваренных между собой по пе-

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

риметру так, чтобы между ними образовалось замкнутое пространство 9-20 мм, заполненное сухим воздухом (рис. 8.10). Изготавливают пакеты из оконного, термически полированного, витринного неполированного и полированного, теплопоглощающего и других видов листового стекла обычно прямоугольной формы с соотношением длины и ширины не более чем 5.

Основные свойства стеклопакетов приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Физические свойства стеклопакетов

| Показатель                                                  | Стеклопакет из двух стекол |         | Стеклопакет из трех стекол |         |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|
|                                                             | с воздушной прослойкой, мм |         |                            |         |
|                                                             | 15                         | 20      | 15                         | 20      |
| Коэффициент теплопередачи, Вт/м <sup>2</sup>                | 3,13                       | 2,72    | 1,97                       | 1,74    |
| Светопроницаемость, %                                       | 70                         | 70      | 60                         | 60      |
| Звукоизолирующая способность при средней частоте 550 Гц, дБ | 40...45                    | 40...45 | 48...55                    | 48...55 |

В зависимости от конструкции стеклопакеты разделяют на однокамерные без обрамляющей рамки (СПО); однокамерные с обрамляющей рамкой (СПОР); двухкамерные без обрамляющей рамки (СПД).

В прослойках клееных стеклопакетов обычно размещают активный влагопоглотитель, что в сочетании с их герметичностью дает возможность предотвратить образование конденсата на внутренних поверхностях при температуре внешнего воздуха до -50 °С.

Клееные стеклопакеты имеют рамки из стали, алюминия или синтетических материалов. Пространство между рамкой и ребрами стекол заполняют уплотняющей эластичной массой.

Клееными стеклопакетами заполняют внешние проемы с однорамными коробками – окна, витрины, зенитные фонари и балконные двери зданий различного назначения. Кроме клееных, возможно изготовление спаянных и сварных стеклопакетов.

Применение стеклопакетов дает возможность уменьшить толщину конструкций рам приблизительно в 2,5 раза, массу – не менее чем на 15 %, затраты материалов на изготовление рам – на 30-40 %,

повысить несущую способность стекол по отношению к ветровым и снеговым нагрузкам в 1,4 раза, улучшить свето- и теплотехнические показатели остекления.

Разновидностью стеклопакетов является *стевит* – изделие из двух листов стекла, соединенных по периметру герметиком и окантованных водостойкой эластичной лентой, между которыми находится светорассеивающая прокладка из стекловолоконного материала.

Он применяется для устройства светопрозрачных ограждений в помещениях, в которых необходимо мягкое освещение, равномерное распределение света с недопущением сквозной видимости и уменьшением солнечной радиации.

*Стекло строительное профильное (стеклопрофилит)* – прокатное стекло швеллерного, ребристого, обрезного, коробчатого (рис.8.11), треугольного и других сечений, постоянных по длине. Оно предназначено для устройства светопрозрачных ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Профильное стекло рассчитано на перепад температур не менее 40°C. Его изготавливают бесцветным и цветным, армированным и неармированным, с гладкой (кованой), рифленной или узорчатой поверхностью.

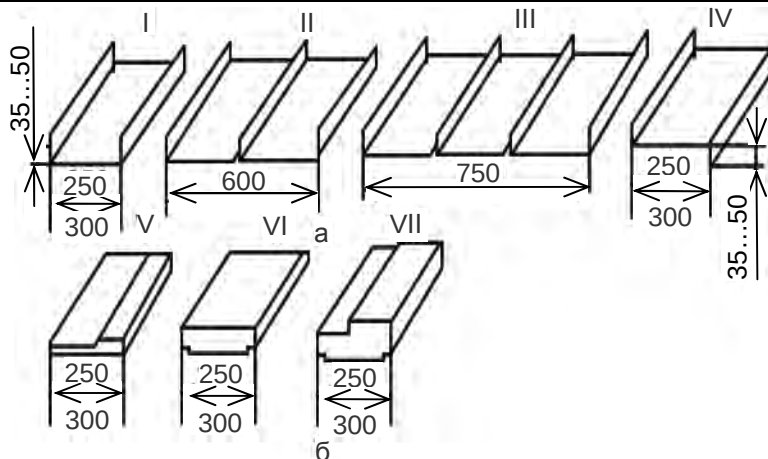
Коробчатое профильное стекло, устанавливаемое вертикально, рекомендуется изготавливать высотой не более 4,8 м, а швеллерное – 2,4 м.

Для уплотнения и герметизации стыков между элементами профильного стекла используют гидроизоляционные мастики и пористую резину.

*Блоки пустотелые* – стеклянные изделия, получаемые свариванием по периметру двух отпрессованных полублоков, внутренняя поверхность которых может быть гладкой или рифленной (рис. 8.12). Внутри блоков образуется вакуумная воздушная полость.

Изготавливают неокрашенные и цветные квадратные и прямоугольные стеклблоки.

Внешние поверхности лицевых стенок блоков должны быть гладкими, а торцевых – рифлеными. Внутренние поверхности лицевых стенок блоков гладкие или имеют рельефный узор, а торцевые – только гладкие. Толщина лицевых стенок блоков – не менее 8 мм.

**Рис. 8.11.** Виды профильного стекла:

а – открытого сечения; б – закрытого сечения; I – швеллерное;  
 II, III – ребристое; IV – обрезное; V – коробчатое с одним швом  
 КП; VI – коробчатое с двумя швами КП-2; VII – коробчатое  
 с овальными кромками боковых стенок

Основные физико-механические свойства стеклоблоков приведены в табл. 8.5.

Таблица 8.5

Физико-механические свойства стеклоблоков

| Блоки                                            |          |          |          |
|--------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| Показатели                                       | БК194/98 | БК244/98 | БП294/98 |
| Коэффициент светопропускаемости не менее:        |          |          |          |
| для гладкой внутренней поверхности               | 0,50     | 0,55     | 0,53     |
| для рифленой внутренней поверхности              | 0,60     | -        | 0,33     |
| Допустимые остаточные внутренние напряжения, МПа | 6,0      | 6,0      | 6,0      |
| Термостойкость °С, не менее                      | 40,0     | 40,0     | 40,0     |
| Предел прочности при сжатии, МПа, не менее       | 1,5      | 1,5      | 1,5      |
| Сопротивление удару, МПа, не менее               | 0,8      | 0,8      | 0,8      |

**Примечание.** Условное обозначение блоков состоит из букв БКЦ (блок квадратный цветной) или БП (блок прямоугольный), а также из числовых значений длины и ширины блоков.

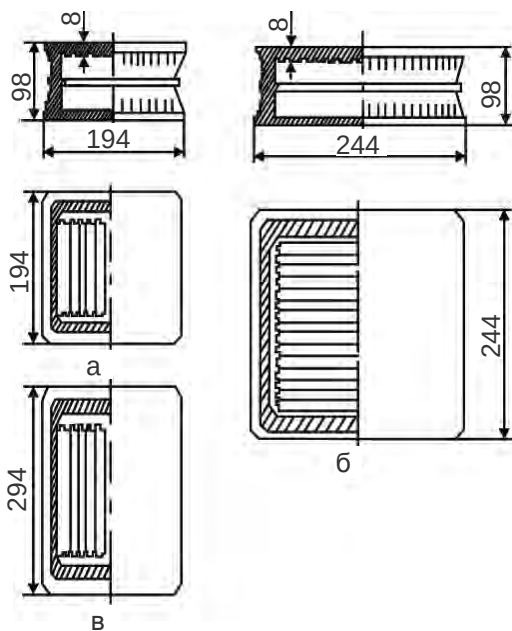


**Рис. 8.12.** Конструкции пустотных стекло-  
блоков: а – БК 194/98; б – БК 244/98;  
в – БП 294/194/98

Стеклянные пустотелые блоки применяют для заполнения световых проемов (рис. 8.13), устройства светопрозрачных ограждений и перегородок, застекления лестничных клеток, ограждений лифтовых шахт и т.п. Ограждения из стеклоблоков создают мягкое рассеянное освещение, увеличивают глубину природной освещенности, предотвращают сквозную видимость. Они имеют высокие огнестойкость, герметичность, тепло- и звукоизоляционную способность. Ограждения из стеклоблоков возводят как кладкой их непосредственно в проеме, так и установкой предварительно изготовленных стекложелезобетонных панелей.

Для утепления ограждающих конструкций зданий и сооружений, морозильных установок и тепловых агрегатов применяют пеностекло. Этот материал применяют также как отделочный и акустический. *Пеностекло* – стекло с ячеистой структу-

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

рой, получаемое вспучиванием при 750-850°C размягченной стекломассы, содержащей газообразователь. При получении пеностекла с замкнутыми порами применяют в качестве газообразователя кокс, сажу и другие углеродсодержащие материалы; пеностекла с сообщающимися порами - известняк, доломит и др. Высокая пористость (80-95%) позволяет обеспечивать низкую среднюю плотность (100-700 кг/м<sup>3</sup>) пеностекла, а благоприятная структура (рис. 8.14), равномерное распределение пор – относительно высокую *прочность* и *водостойкость*, малое *водопоглощение*. Температурустойчивость обычного пеностекла составляет 300-400°, а бесщелочного 800-1000° С. Пеностекло легко обрабатывается режущим инструментом и воспринимает различную окраску.

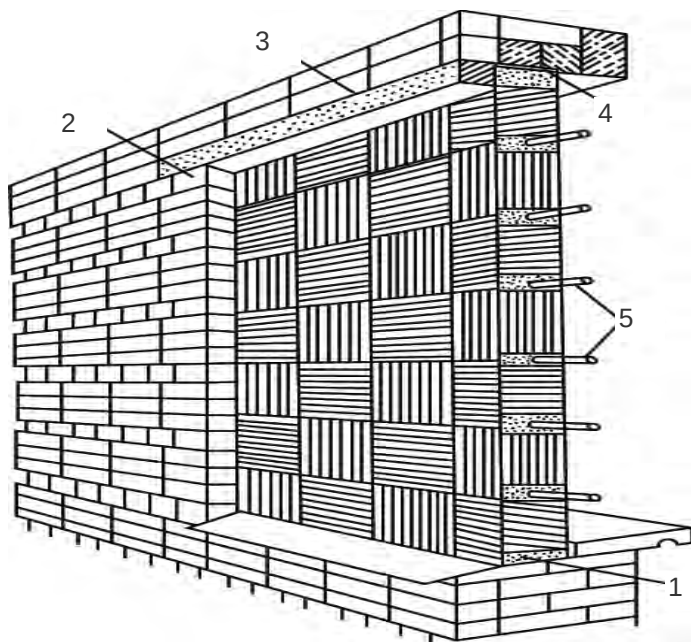


**Рис. 8.13.** Заполнение проема стеклблоками:

- 1 – раствор; 2 – четверть простенка;
- 3 – перемычка; 4 – стекловата;
- 5 – арматурные стержни



Характеристика разных видов пеностекла приведена в табл. 8.6.

Таблица 8.6

Характеристика различных видов пеностекла

| Показатель                                                | Пеностекло           |                                   |                   |             |
|-----------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------|
|                                                           | изоляция-<br>ционное | изоляция-<br>ционно-<br>монтажное | водоза-<br>щитное | специальное |
| Средняя плотность,<br>кг/м <sup>3</sup>                   | 150...250            | 130...160                         | 140...148         | 250...500   |
| Коэффициент тепло-<br>проводности,<br>Вт/(м·°C)           | 0,06...0,0<br>87     | 0,055...0,07                      | 0,06...0,07       | 0,1...0,125 |
| Предел прочности<br>при сжатии, МПа                       | 0,08...2             | 0,5...0,8                         | 0,6...0,9         | 3...5       |
| Максимально допус-<br>тимая температура<br>применения, °C | +400                 | +160...+400                       | +600              | —           |

*Пенодекор* – разновидность пеностекла, изготавливаемого спеканием стеклопорошка с введением газообразующих добавок. Сырьем для получения стеклопорошка является стеклобой тарного, листового и других видов стекла. Газообразующей добавкой служит мел. В шихту вводят красители.

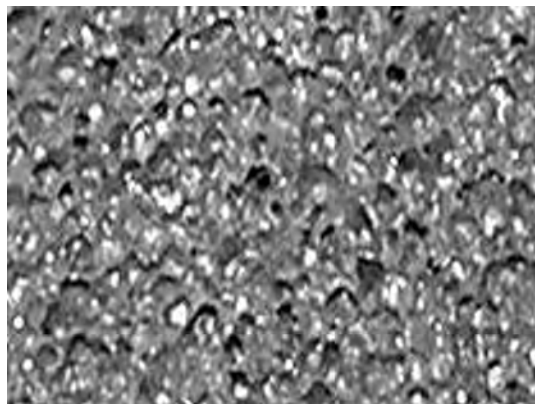


**Рис. 8.14.** Структура пеностекла

Пенодекор изготавливают в виде плит марок по плотности 400, 800, 1000 и 1200, длиной и шириной 150, 200, 300, 400, 450 мм, толщиной – 15-40 мм.

Лицевая поверхность плит из пенодекора покрыта сплошной стекловидной цветной пленкой, обратная сторона – шершавая для надежного сцепления с раствором.

#### 8.4. Волокнистые материалы из силикатных расплавов

В данную группу материалов входят минеральное и стекловолокно и изделия на их основе. Как разновидности минеральных и стеклянных волокон, представленных сравнительно короткими (от 2 до 20 мм) отрезками стекловидных волокон, можно рассматривать минеральную и стеклянную вату. Минеральное волокно получают из расплавленных горных пород и шлаков, стеклянное – из расплавленной стекломассы. Волокна, полученные из силикатных расплавов, обладают по сравнению с другими волокнистыми материалами более высокими физико-механическими свойствами. Они не горят, не гниют, химически стойки, малотеплопроводны и достаточно прочны. Например, величина предела прочности при разрыве, в МПа для стекловолокон диаметром 3-4 мкм составляет 200-400 МПа, льна – 47-73 МПа, капрона – 50-70 МПа.

**Стекловолоконные материалы.** Для получения *стекляного волокна* используют шихту, состоящую из кварцевого песка, соды или сульфата натрия, полевого шпата с добавками мела и др. Стекловолокно разделяют на непрерывное и штапельное (длиной до 50 см). В зависимости от диаметра стекловолокно бывает: ультратонким (<1), супертонким – 1-2, тонким 3-10, утолщенным 11-20, толстым – более 20 мкм. Стекловолокно разделяют также в зависимости от области применения на текстильное (диаметр 3-7 мкм) и штапельное (1-30 мкм).

Из горных пород для получения минерального волокна наибольшее применение нашли базальты. Непрерывное и штапельное стекловолокно получают штабиковым или фильерным способами. *Штабиковый способ* основан на подогревании и расплавлении стеклянных палочек – штабиков и вытягивании из них стеклянного волокна, наматываемого на барабан, *фильерный* – на вытягивании волокон из стекломассы через фильеры (рис. 8.15).

Свойства стекловолокна зависят от химического состава стекла и способа его получения. По химическому составу стеклянные волокна делят на три группы: бесщелочные (содержание щелочных оксидов не более 1-2% по массе), малощелочные (от 2 до 10%) и щелочные (более 10% по массе щелочных оксидов). Прочность при растяжении стекловолокна намного выше прочности массивного стекла,

что объясняется его меньшей неоднородностью, наличием упрочненного поверхностного слоя. Увеличение прочности с уменьшением диаметра волокон (рис. 8.16) объясняется меньшими температурными градиентами, возникающими при охлаждении стекла и соответственно меньшей интенсивностью образования трещин.

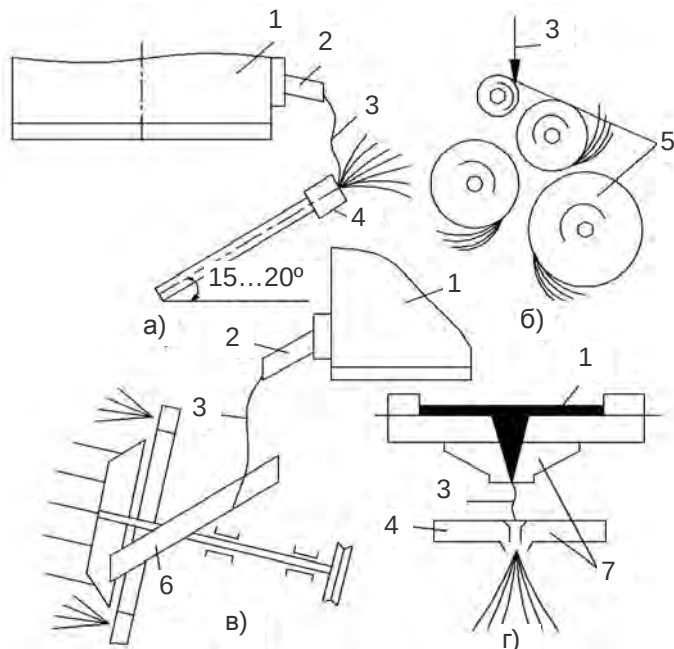


**Рис.8. 15.** Способы переработки силикатного расплава в волокно:  
 а – пародутьевой, б – центробежно-валковый, в – центробежно-дутьевой, г – вертикальный фильерно-дутьевой; 1 – плавильный агрегат, 2 – летка; 3 – расплав; 4 – дутьевая головка;  
 5, 6 – многовалковая и дутьевая центрифуги,  
 7 – фильерно-дутьевое устройство

Средняя прочность элементарного стекловолокна составляет 3500 МПа. Атмосферная влага уменьшает прочность стекла. После нескольких месяцев хранения прочность стекловолокон уменьшается на 10-15% по сравнению с первоначальной. Для предотвращения снижения прочности волокна под действием атмосферной влаги его при вытягивании защищают гидрофобными веществами.

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

Наибольшей прочностью обладает волокно из бесщелочного алюмоборосиликатного стекла. Щелочные оксиды снижают прочность стекловолокна. Наименьшей прочностью обладают волокна из фосфатного и боратного стекол.

В щелочной среде твердеющего цементного камня относительно высокой стойкостью обладают стекла в системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  составов (мол.%):  $\text{Na}_2\text{O}$  0,14-0,3;  $\text{MgO}$  10-30;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0-15;  $\text{SiO}_2$  50-70. Увеличение прочности стекловолокна достигается воздействием на его поверхность с целью уменьшения количества микродефектов при термообработке.

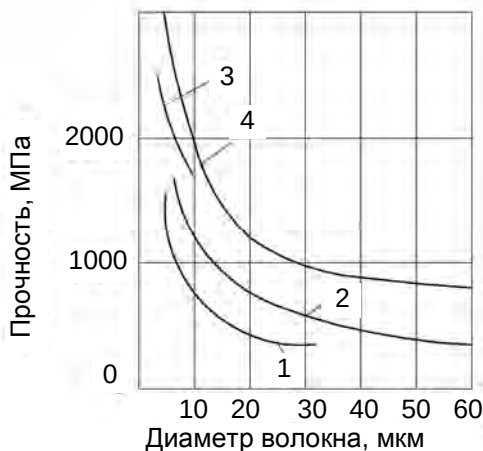


**Рис. 8.16.** Зависимость предела прочности от диаметра волокна, полученного различными способами: 1 – раздува; 2 – штабиковым; 3 – вытягиванием из фильера сжатым воздухом; 4 – вытягиванием из фильера при помощи быстровращающегося барабана

Промышленные волокна выпускают в виде коротких (до 60 см) образцов одиночных волокон (штапельное волокно) и непрерывных длиной сотни и тысячи метров.

Из базальтовых расплавов, так же как из стеклянных, получают штапельные и непрерывные базальтовые волокна.

Стекловолокно и базальтовое волокно используется для получения электроизоляционных лент и тканей, тканей для конструкционных стеклотекстолитов,

фильтровальных тканей и др.

К нетканым материалам относятся стекловолокнистый холст, маты, теплоизоляционные плиты из ультратонкого волокна и др.

**Минеральная вата.** Минеральная вата представлена преимущественно (на 80...90%) стекловидными волокнами диаметром менее

7 мкм с длиной от 2 до 10 мм (рис. 8.17). В состав ваты входят также частички застывшего расплава, не сформировавшиеся в волокна – т.н. “корольки”. Воздушные пустоты, заключенные между волокнами ваты и определяющие ее теплоизоляционные свойства, составляют 95...96% от общего объема ваты. Корольки увеличивают плотность и теплопроводность ваты.

Основным показателем химического состава минеральной ваты является модуль кислотности:

$$M_k = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO} \geq 1,2, \quad (8.7)$$

где  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$  и  $MgO$  – содержание соответствующих оксидов по массе.

При промышленном изготовлении минеральной ваты ее химический состав находится в диапазоне:  $SiO_2$  – 35-50%,  $Al_2O_3$  – 5-18%,  $CaO$  – 20-40%,  $MgO$  – 2-10%. В сравнительно небольшом количестве могут входить оксиды железа, марганца, серы и др.



**Рис. 8.17.** Микроструктура минеральной ваты

Для изготовления минеральной ваты применяют как природное сырье (диабазы, базальты, сиениты, порфириды, граниты, известняки, мергели и др), так и побочные продукты промышленности (металлургические шлаки, золы тепловых электростанций и др). Обычно составляют шихту, состоящую из двух или более компонентов, обеспечивающую необходимый модуль основности.

Производство ваты включает два основных процесса: 1) расплавления шихты до образования расплава с необходимыми показателями вязкости и поверхностного натяжения; 2) переработки расплава с получением волокна.

Расплав, вытекающий из плавильной установки, имеет обычно вязкость 0,2-1,5 Па·с. Наряду с абсолютным значением вязкости расплава важным является также учет скорости нарастания вязкости при снижении температуры. Для производства минеральной ваты желательно использовать т.н. “длинные” расплавы, т.е. расплавы, медленно затвердевающие и имеющие большой интервал вязкости.

Температура расплава, поступающего на переработку, должна быть выше температуры его кристаллизации. Образующиеся в плавильной печи силикатные расплавы имеют температуру верхнего предела кристаллизации 1150-1300 °С. Одним из важных показателей способности вытягивания минерального расплава в волокна является отношение его вязкости к поверхностному натяжению, т.е. силам свободной энергии его поверхности.

На вязкость расплавов существенно влияет их химический состав. С повышением содержания  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  вязкость возрастает. Увеличение до определенного предела количества  $\text{CaO}$  приводит к снижению вязкости расплава, лишь при высоком его содержании (более 45%) вязкость может несколько повыситься. Содержание  $\text{MgO}$  снижает вязкость расплава в большей степени, чем  $\text{CaO}$ . Понижает вязкость расплава также содержание щелочных оксидов, оксидов марганца и железа. Для понижения поверхностного натяжения расплавов используют поверхностно-активные вещества, оксиды хрома.

Из множества видов плавильных установок наиболее распространены в производстве минеральной ваты вагранки. Применяют также ваннные, шлакоприемные, электродуговые и другие печи.

Способы переработки силикатного расплава на вату подразделяют на дутьевые, центробежные, комбинированные (рис. 8.15).

При дутьевом способе на струю расплава, вытекающего из печи, воздействует струя водяного пара или сжатого газа. Центробежный способ основан на использовании центробежной силы и имеет ряд разновидностей в зависимости от конструктивных особенностей центрифуг.

Наиболее широко применяют центробежно-дутьевой способ, основанный на применении центробежной силы и дутья для формирования струи расплава и вытягивания волокна.

В соответствии с ГОСТ 4640-93 вату в зависимости от диаметра волокна подразделяют на три вида:

ВМСТ – вата минеральная из супертонкого волокна диаметром от 0,5 до 3 мкм;

ВМТ – вата минеральная из тонкого волокна диаметром от 3 до 6 мкм;

ВМ – вата минеральная диаметром волокна от 6 до 12 мкм.

Вату вида ВМ в зависимости от значения модуля кислотности подразделяют на типы: А –  $M_k > 1,6$ ; Б –  $M_k = 1,4-1,6$ ; В –  $M_k = 1,2-1,4$ .

Основные нормируемые требования к минеральной вате приведены в табл. 8.7.

Таблица 8.7

Основные нормируемые показатели качества минеральной ваты

| Показатель                                                 | Вид ваты |       |       |         |       |
|------------------------------------------------------------|----------|-------|-------|---------|-------|
|                                                            | ВМ       |       |       | ВМСТ    | ВМТ   |
|                                                            | А        | Б     | В     |         |       |
| Водостойкость, рН, не более                                | 4        | 5     | 7     | 4       | 4     |
| Средний диаметр волокна, МКМ, не более                     | 6        | 8     | 12    | 0,5...3 | 3...6 |
| Содержание неволокнистых включений св.0,25 мм, %, не более | 12       | 20    | 25    | 5       | 8     |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup> , не более                    | 80       | 90    | 10    | 35      | 50    |
| Теплопроводность, Вт/(м·°С), при 25°С                      | 0,045    | 0,045 | 0,050 | 0,041   | 0,041 |

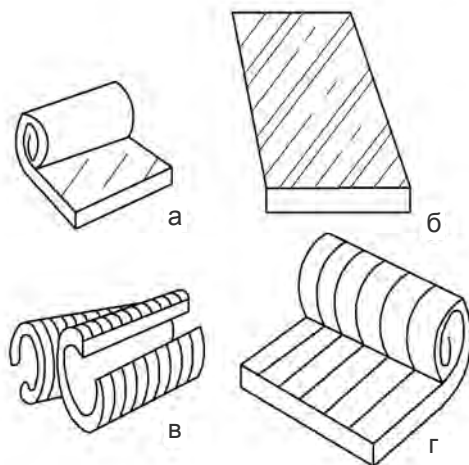


**Рис. 8.18.** Изделия из минеральной ваты: а – войлок; б – полужесткая плита; в – изоляционные скорлупы; г – прошивной мат

На основе минеральной и стеклянной ваты изготавливают изделия различной формы с использованием в качестве связующих синтетических полимеров, битумов, эмульсий и паст. Основными видами изделий являются мягкие, полужесткие и жесткие плиты, цилиндры, полуцилиндры (рис. 8.18).

Физико-механические свойства изделий из минеральной и стеклянной ваты приведены в табл. 8.8.

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

Основная масса изделий применяется для тепловой изоляции ограждающих конструкций, трубопроводов, звукоизоляции.

Таблица 8.8

Физико-механические свойства изделий  
из минеральной и стеклянной ваты

| Виды изделий                                       | Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> | Теплопроводность при 25±5°С, Вт/м°С | Предел прочности при растяжении, МПа, не менее | Сжимаемость под нагрузкой 0,002 МПа, не более % | Предельная температура применения, °С |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Минераловатные изделия                             |                                      |                                     |                                                |                                                 |                                       |
| Маты прошивные                                     | 85...<br>135                         | 0,044                               | —                                              | 30...40                                         | -180...<br>+600                       |
| Маты вертикально-слоевые                           | 50...<br>125                         | 0,047<br>...<br>0,057               | —                                              | 2...5                                           | -120...<br>+300                       |
| Плиты на битумном связующем                        | 75...<br>250                         | 0,046<br>...<br>0,064               | 0,075...<br>0,008                              | 4,5...5,5                                       | -100...<br>+60                        |
| Плиты на синтетическом связующем                   | 35...<br>350                         | 0,044...<br>0,066                   | 0,008...<br>0,01                               | 4...15                                          | -100...<br>+400                       |
| Цилиндры и полуцилиндры на синтетическом связующем | 75...<br>225                         | 0,048<br>...<br>0,052               | 0,015...<br>0,025                              | —                                               | -100...<br>+400                       |
| Стекловатные изделия                               |                                      |                                     |                                                |                                                 |                                       |
| Плиты на синтетическом связующем                   | 40...<br>200                         | 0,05...<br>0,057                    | —                                              | 10                                              | -60...<br>+180                        |
| Маты строительные                                  | 25...<br>50                          | 0,045...<br>0,047                   | —                                              | 40...50                                         | до +500                               |



Из каолинового и кремнеземистого сырья выпускают высокотемпературную вату и изделия с температурой применения до 1250°C.

К эффективным материалам относятся базальто-волокнистые изделия, имеющие улучшенные теплоизоляционные свойства, температуростойкость (до 750 °C) и долговечность.

## 8.5. Стеклокристаллические материалы

Стеклокристаллические материалы получают кристаллизацией стекла или каменного расплава соответствующего химического состава. Их разделяют на материалы с преобладанием стекловидной фазы или кристаллической фазы.

**Материалы с преобладанием стекловидной фазы.** В эту группу входят стеклокристаллические материалы, содержание стекловидной фазы в которых превышает, как правило, 70%. К ним относится ряд таких отделочных материалов как сигран (синтетический гранит), марблит и стекломрамор, авантюриновое стекло, стеклокремнезит. Они применяются обычно в виде плиток для внешней и внутренней облицовки зданий и сооружений различного назначения. В эту группу входят также декоративная стеклокрошка, коврово-мозаичная плитка и смальта.

*Сигран* получают на основе стекла из доменных шлаков и некоторых других промышленных отходов. По фактуре этот материал напоминает природные камни.

*Марблит* – цветное глушеное стекло, имитирующее мрамор, изготавливаемое прокатом отходов стекла с добавками металлургического шлака. К нему близок по составу и свойствам *стекломрамор*.

*Авантюриновое стекло* – облицовочный материал, в котором при охлаждении образуются кристаллы, создающие эффект мерцания, характерный для одноименного природного камня. Он обусловлен различием показателей преломления кристаллических включений и стекла. Наиболее распространено авантюриновое стекло, содержащее хром.

*Стеклокремнезит* изготавливают в виде двухслойных плиток. Нижний слой получают спеканием шихты, состоящей из измельченного стеклобоя, кварцевого песка и глины. Верхний декоративный слой получают из стеклогранулята.

*Коврово-мозаичная плитка* применяется для внутренней облицовки стен кроме цоколей и карнизов, колонн, изготовления декоративно-художественных панно. Изготавливают такую плитку из глушеного и по-

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

луглушеного цветного стекла методом проката. Основные размеры 46×45×5 мм.

Коврово-мозаичные плитки поставляются в коврах, изготовленных наклеиванием плиток на бумагу.

Облицовывая железобетонные панели в заводских условиях, ковры укладывают на поддон металлической формы бумагой книзу, после чего устанавливают арматурные каркасы, укладывают и уплотняют цементный раствор, а затем бетонную смесь. После тепловой обработки фасад-

ную сторону панели очищают от бумаги, смачивают теплой водой и обрабатывают вращающимися капроновыми щетками.

Смальта (рис. 8.19) – куски цветного непрозрачного листового или прессованного стекла разнообразной формы, из которых складывают ковры на бумаге. Применяют смальту для внутренней и внешней декоративно-художественной облицовки зданий, мозаичных работ, панно и т.п.



**Рис.8.19.** Стекло-  
смальта

**Материалы с преобладанием кристаллической фазы.** Основными представителями этой группы стеклокристаллических материалов являются ситаллы. *Ситаллы* – (термин образован из слов стекло и кристаллы) – материалы, имеющие микрокристаллическую структуру и получаемые направленной кристаллизацией стекол специальных составов. Ситаллы подразделяют на две группы: технические и на основе горных пород и промышленных отходов. Технические ситаллы классифицируют по назначению (химически- и износостойкие, оптические, термостойкие, электроизоляционные и др.) и по химическому составу (сподуменовые, кордиеритовые, борносвинцовые, борнобариевые и др.). Группа ситаллов на основе промышленных отходов и горных пород состоит в основном из шлакоситаллов и петроситаллов.

Производство ситаллов базируется на направленной каталитической кристаллизации стекол. Известно, что образование зародышей новой фазы ускоряется, если в системе имеются инициаторы зародышеобразо-

вания, например коллоидные включения, примеси. В практике нашел применение метод искусственного введения примесей, облегчающих кристаллизацию раствора или расплава.

К неметаллическим катализаторам относится большая группа разных химических соединений - оксиды, сульфиды, фосфаты, фториды и др.

Технологическими этапами получения изделий из ситаллов являются: приготовление шихты, содержащей катализатор кристаллизации; варка стекла и формование изделий; кристаллизация стекла путем специальной термообработки при температурах стеклования (600...950°C); при необходимости — отжиг изделий.

Существует множество специальных видов ситаллов: ситаллоцементы; прозрачные ситаллы; ситаллы, поглощающие нейтроны; цветные ситаллы и ситаллоэмали; высокоогнеупорные ситаллы; фотоситаллы.

Широкое распространение получило производство и применение ситаллов на основе промышленных отходов и горных пород и прежде всего — *шлакоситаллов*. Первые образцы ситалла из доменного шлака были получены на Константиновском заводе “Автостекло”.

Принципиально шлакоситаллы не отличаются от технических ситаллов, однако их можно получать в более широких масштабах из дешевого сырья.

Переработка шлаков в шлакоситаллы проводится на конвейерных линиях (рис.8.20). Для получения шлакового стекла в шихту вводят, кроме шлака (50...65%), кварцевый песок (20...40%), глину (0...11%). В качестве добавок применяют сульфат натрия, уголь и катализаторы. Для получения шлакоситалла белого цвета в стекло вводят оксид цинка, который взаимодействует с сульфидами тяжелых металлов, имеющими темный цвет. Отбеленному шлакоситаллу может быть придан любой цвет при дополнительном введении красителей.

Шлакоситалл на 60-70% состоит из кристаллической фазы, отдельные зерна которой окружены и сцементированы прослойкой остаточного стекла. Размер кристаллов не превышает 0,5-1 мкм. Весьма малые размеры кристаллов, небольшие различия в коэффициентах термического расширения и плотностях кристаллической и стекловидной фаз, хорошее сцепление кристаллов со стекловидной связкой обеспечивают повышенные прочностные и антикоррозионные свойства материала.

В настоящее время разработаны составы шлакоситаллов на основе доменных шлаков, шлаков цветной металлургии, конвертерных шлаков, шлаков фосфорного производства. По виду основной кристаллической

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

фазы, выделяющейся в процессе каталитической кристаллизации, шлакоситаллы подразделяются на следующие типы: волластонитовые, пироксеновые, анортитовые, мелилитовые, форстеритовые.

Дешевыми стеклокристаллическими материалами являются также золо- и петроситаллы, получаемые на основе топливных зол или различных горных пород. *Золоситаллы* обладают повышенными физико-механическими свойствами и могут быть использованы как прочные износостойкие материалы в строительстве и различных областях промышленности. *Петроситаллы* обладают более высокими свойствами в сравнении с каменным литьем, меньшей пористостью, более мелкозернистой структурой, повышенной механической прочностью и химической стойкостью.

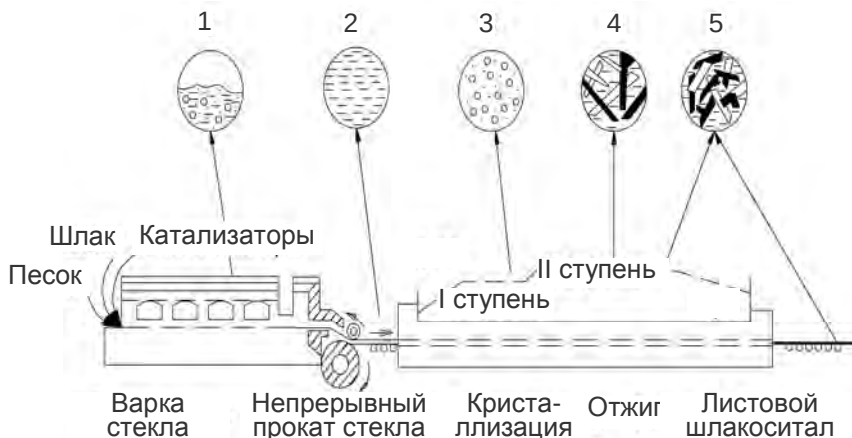


**Рис. 8.20.** Схема получения шлакоситалла: 1 – стекломасса; 2 – стекло  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ ; 3 – центры кристаллизации; 4 – волластонит  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , стеклофаза; 5 – волластонит  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , анортит  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , стеклофаза

Ситаллы имеют тонкозернистую поликристаллическую структуру (рис. 8.21), главное отличие которой от структуры тонкозернистой керамики состоит в том, что размер зерен ситаллов во много раз меньше, чем размер кристаллов керамики. Так, если размер зерен керамики после спекания составляет 10-20 мкм, то в ситаллах он находится в пределах 1-0,02 мкм. В структуре ситаллов отсутствуют поры, пустоты и другие грубые дефекты, характерные для керамики.

Свойства ситаллов в значительной мере зависят от соотношения фаз стекло – кристалл. С ростом степени закристаллизованности ситаллов увеличивается их плотность. С учетом типа выделяющихся кристаллов она колеблется от 2300 до 6000 кг/м<sup>3</sup>.

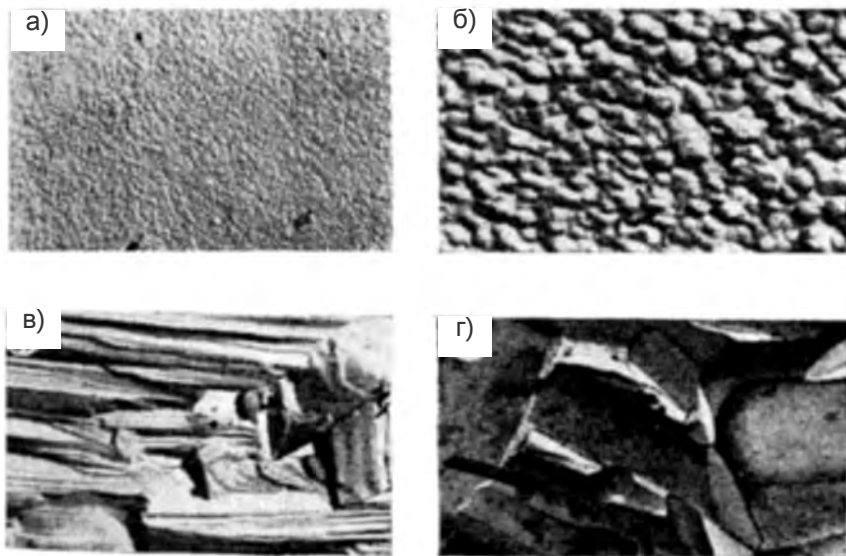


**Рис. 8.21.** Электронно-микроскопические снимки стекла системы  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$  в процессе кристаллизации (выдержка при каждой температуре 2 ч;  $\times 11500$ )

а – исходное стекло; б – стекло при температуре 700°C; в – 1000°C; г – 1100°C

Ситаллы обладают более высокой прочностью по сравнению со стеклом и большинством керамических материалов. На прочность влияет вещественный состав, количество и размер кристаллических зерен. Предел прочности при изгибе колеблется от 30 до 250 МПа.

На величину прочности ситаллов влияют режим термообработки, состояние поверхности, температура. С повышением последней прочность ситаллов монотонно уменьшается, хотя и остается при этом больше чем прочность стекла при одной и той же температуре.

Модуль упругости ситаллов выше, чем у исходного стекла. Он является аддитивной функцией модулей упругости кристаллических и стеклообразных фаз. Для ситаллов характерны также значительно более вы-

## 8. Стекло и стеклокристаллические материалы

---

ские, чем у стекол, показатели твердости, износостойкости и сопротивления истиранию.

Переход стекла в закристаллизованное состояние вызывает значительное увеличение электрического сопротивления. Диэлектрическая проницаемость большинства ситаллов мало меняется с частотой тока. По сравнению с керамическими материалами и стеклом ситаллы обладают более высокой электрической прочностью, т.е. способностью диэлектрика выдерживать без разрушения и потери изоляционных свойств воздействие электрического поля высокого напряжения.

Для ситаллов характерен широкий диапазон возможных коэффициентов теплового расширения, которые определяются их фазовым составом. Существуют стеклокристаллические материалы как с отрицательным коэффициентом линейного, так и с большим положительным коэффициентом. Благодаря повышенной прочности ситаллы обладают и повышенной термостойкостью. Так, например, ситалл с температурным коэффициентом линейного расширения около  $(5-10) \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  выдерживает тепловой удар в  $700^\circ\text{C}$ .

В строительстве ситаллы применяют для изготовления самонесущих панелей, перегородок, плит и блоков для облицовки стен, мощения дорог, ограждений балконов, лестничных маршей, волнистой кровли, санитарно-технического оборудования и др. Ситаллы применяют для футеровок емкостей химической, горнорудной и других отраслях промышленности, труб, высоковольтных изоляторов и др.

К стеклокристаллическим материалам, применяемым в строительстве, можно отнести наряду с ситаллами *каменное и шлаковое литье* – материалы, полученные плавлением изверженных или осадочных горных пород и шлаков, разливкой расплава в формы и термической обработкой изделий с целью прохождения кристаллизации и снятия напряжений. Истираемость изделий из каменного литья в 3-5 раз меньше чем гранита и составляет  $0,016-0,1 \text{ г/см}^2$ , а предел прочности при сжатии –  $200 \dots 400 \text{ МПа}$ .

Основными видами каменных литых изделий являются плиты, трубы и другие детали, предназначенные для работы в суровых климатических и эксплуатационных изделиях. Из расплавленных металлургических шлаков отливают камни для дорог и полов промышленных зданий, тубинги, трубы и др. По износостойкости, жаростойкости и ряду других свойств шлаковое литье превышает железобетон и сталь.

## 9. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Металлические материалы – материалы на основе металлов и сплавов – веществ, имеющих характерный блеск, высокую электро- и теплопроводность и способных к значительным пластическим деформациям, что дает возможность обрабатывать их под давлением: прокатом, ковкой, штамповкой, волочением.

Необходимые свойства металлических материалов обеспечиваются применением сплавов, получаемых сплавлением различных металлов или металлов с неметаллами.

Металлы и сплавы разделяют на черные и цветные. К черным металлам принадлежат железо и сплавы на его основе (чугун, сталь, ферросплавы), а к цветным – медь, алюминий, цинк, никель и др.

В современной технике, в том числе в строительстве, наиболее широко применяют *железоуглеродистые сплавы – углеродистые стали* (до 2,14% С) и *чугуны* (более 2,14% С). Удельный вес их в общем объеме металлических конструкционных материалов составляет 95 – 97%.

Металлические материалы в строительстве применяют преимущественно в виде различных *прокатных изделий* – листовых, уголовых, двутавровых и швеллерных профилей, труб. До трети всего объема черных металлов, расходуемых в строительстве, применяется как арматура (*арматурный прокат*) для железобетонных конструкций. Из прокатных профилей возводят несущие конструкции зданий и сооружений, опоры ВЛ, мостовые конструкции, резервуары и т. п.

Непрерывно увеличивается производство легких стальных конструкций из экономичных профилей проката и низколегированных, высокопрочных сталей. Масса легких конструкций по сравнению с обычными стальными конструкциями меньше в 4 – 6 раз, стоимость их сокращается на 30-40%, примерно на одну треть уменьшаются трудовые затраты.

Расширяется применение легких *сплавов из цветных металлов* и в особенности алюминия. Из алюминиевых сплавов изготавливаются каркасные конструкции (рис. 9.1), наружные стеновые панели, конструкции подвесных потолков и перегородок, оконные переплеты, двери, витражи, жалюзи и т.п. Приближаясь по прочности к

## 9. Металлические материалы

конструкциям из строительных сталей, конструкции из алюминиевых сплавов имеют меньшую массу ( $2,7\text{--}2,9 \text{ т/м}^3$ ) и обладают лучшей огнестойкостью и сейсмостойкостью, хладостойкостью и долговечностью.

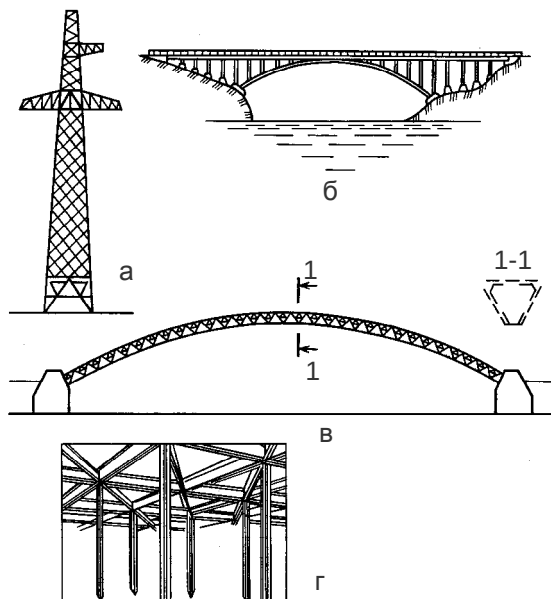


**Рис. 9.1.** Алюминиевые каркасные конструкции:  
а – опора ВЛ; б – каркас моста; в – трехпропной каркас  
арочного покрытия; г – каркас здания

### 9.1. Структура металлов и сплавов

Металлы и сплавы относятся к поликристаллическим телам, состоящим из мелких ( $10^{-1}\text{--}10^{-5}$  см) различно ориентированных кристаллов, называемых *кристаллитами* или *зернами*.

Кристаллы, входящие в большинство металлов, образуют высокосимметричные или объемно-гранецентрированные плотноупакованные кристаллические решетки (рис. 2.2).

Объемно-центрированная кубическая решетка (ОЦК) характерна для вольфрама, ванадия, хрома, ниобия, гранецентрированная кубическая (ГЦК) – для меди, алюминия, никеля,  $\gamma$ -железа, гексагональ-



ная плотноупакованная (ГП) – для магния, цинка, кадмия и других металлов.

В металлах с ГЦК и ГП решетками атомы образуют металлические связи (для таких связей характерно существование положительно заряженных атомов и свободно перемещающихся электронов – “электронного газа”) (рис. 9.2), поэтому они обладают высокой пластичностью и электропроводностью. В металлах с ОЦК решеткой есть доля ковалентных связей, поэтому для них характерны более высокие твердость и температура плавления.

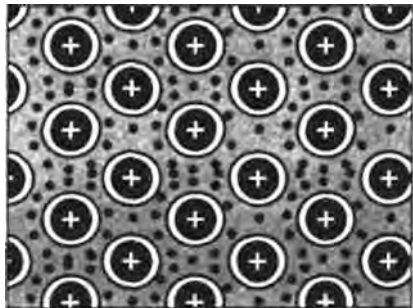


**Рис. 9.2.** Схема металлической связи

При быстром охлаждении можно получить не кристаллическое, а аморфное твердое состояние металла, для которого характерен только ближний порядок в расположении атомов. Здесь структурными элементами, в отличие от кристаллов, являются атомные конфигурации, которые могут не иметь пространственной симметрии.

Для кристаллической структуры металлов характерны точечные, линейные, поверхностные и объемные дефекты. К точечным дефектам относятся *вакансии* – свободные узлы кристаллической решетки, межузловые и примесные атомы (рис.2.8).

Линейные дефекты кристаллической решетки представлены *дислокациями* и *дисклинациями*. Первые характеризуют определенную зону сдвига, вторые – поворот кристаллической решетки (рис. 9.3).

Поверхностные (двумерные) дефекты возникают на границах отдельных кристаллов. Мельчайшие кристаллы, слагающие металлы, ориентированы по-разному, что вызывает на их границах дислокации различного вида. Тонкие слои вблизи поверхности кристалла содержат также повышенное количество точечных и линейных дефектов.

К объемным дефектам относятся скопления вакансий, микрополостей, микротрещин, частиц посторонних включений.

Наличие дефектов кристаллической структуры металлов существенно влияет на их свойства. Например, наличие примесных атомов

может повышать прочность, электросопротивление металлов, вызывать их охрупчивание и т.д. Наиболее значительно на свойствах металлов сказываются дислокации. Наличие, в основном, дислокаций в структуре железа снижает его реальную прочность по сравнению с теоретической почти в 100 раз (от 1300 до 150 МПа). В соответствии с дислокационной теорией снижение прочности реальных металлов обусловлено движением дислокаций под действием приложенного напряжения.

Количество дислокаций измеряется их общей протяженностью в единице объема – *плотностью дислокаций*  $\rho$ . Плотность дислокаций в деформированном металле составляет  $10^9$ - $10^{12}$  см<sup>-2</sup>, в отожженном -  $10^5$ - $10^7$  см<sup>-2</sup> в специально выращенных монокристаллах – до  $10^2$ - $10^3$  см<sup>-2</sup>.

На рис. 9.3 показано влияние плотности дислокаций на прочность металлов. Точка *a* соответствует теоретической прочности бездефектных кристаллов. Прочность

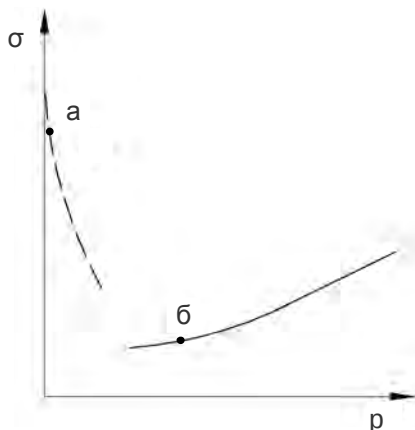


**Рис. 9.3.** Влияние плотности дислокаций на прочность металла

близкую к теоретической имеют нитевидные кристаллы или “усы”, имеющие толщину, измеряемую микронами. Начало кривой *б* характеризует прочность отожженных чистых металлов. Деформация, легирование, термообработка увеличивают количество дефектов кристаллического строения, создают различного типа препятствия, тормозящие перемещение дислокаций, и повышают прочность.

Как показывают эксперименты и теоретические расчеты, напряжение пластического течения металлов  $\sigma$  возрастает пропорционально корню квадратному из плотности дислокаций:

$$\sigma = \sigma_0 + AGb\sqrt{\rho_n}, \quad (9.1)$$

где  $\sigma$  – напряжение, необходимое для скольжения дислокаций в кристалле;  $A$  – константа;  $G$  – модуль сдвига металла;  $b$  – вектор

Бюргерса (количественная характеристика, описывающая искажения кристаллической решетки вокруг дислокации).

Пространственные кристаллические решетки металлов образуются при их переходе из жидкого состояния в твердое. По мере понижения температуры атомы группируются в первичные кристаллы – т.н. центры кристаллизации. Второй стадией кристаллизации является рост кристаллов вокруг центров. С началом кристаллизации падение температуры прекращается (рис. 9.4), что объясняется выделением теплоты в процессе группировки атомов. После затвердения металла температура снова понижается.

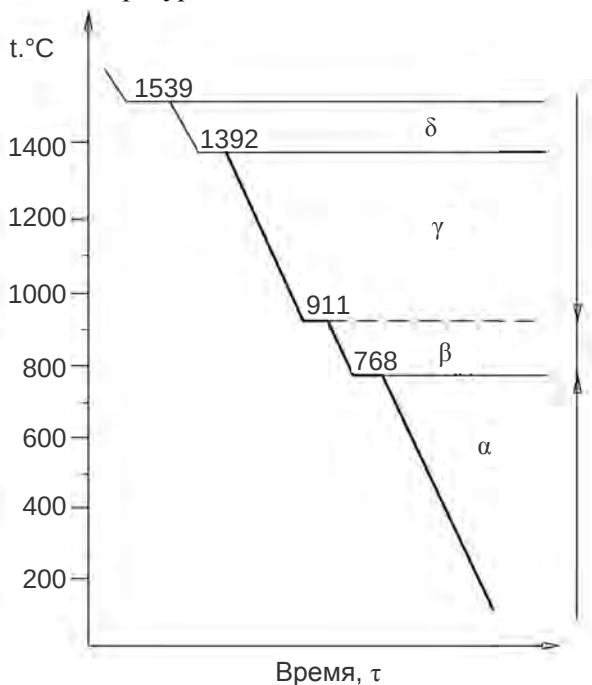


**Рис. 9.4.** Диаграмма охлаждения чистого железа:  
 $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$  – модификации железа, устойчивые  
 в определенном температурном интервале

С увеличением скорости образования центров кристаллизации и уменьшением скорости их роста уменьшается размер кристаллов и образуется более мелкозернистая структура металла, что положительно сказывается на его вязкости и пластичности.

Величина зерен зависит от количества примесей в расплавленном металле. Для получения мелких зерен в жидкий металл вводят специальные добавки. Такой технологический процесс называют *модифицированием*. Часто роль модификаторов играют добавки, образующие более тугоплавкие соединения, кристаллизующиеся в первую очередь (*модификаторы I рода*). Роль модификаторов (*модификаторы II рода*) могут выполнять также добавки, растворимые в жидком металле и избирательно адсорбирующиеся на кристаллических зародышах.

Каждый металл кристаллизуется при определенной температуре. Для многих металлов характерна способность при различных температурах, существовать в различных кристаллических формах. Это свойство называют *полиморфизмом (аллотропией)*. Например, для железа известны четыре полиморфные модификации  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\delta$ , из них практическое значение имеют две –  $\alpha$ -Fe и  $\gamma$ -Fe.

При полиморфных превращениях идет перестраивание кристаллической решетки (перекристаллизация), что сопровождается при охлаждении выделением теплоты, а при нагревании ее поглощением. На кривых охлаждения металлов переход расплава в твердое состояние и переход одной полиморфной модификации в другую характеризуется горизонтальным участком (рис. 9.4).

В результате полиморфных превращений имеет место скачкообразное изменение свойств металлов: теплоемкости, теплопроводности, электрической проводимости, прочности и др.

Металлические сплавы можно рассматривать как системы, состоящие из ряда однородных по составу, структуре и свойствам (гомогенных) частей или фаз, ограниченных поверхностями раздела. Основными фазами сплавов могут служить твердые растворы и химические соединения.

*Твердые растворы* – это твердые фазы, в которых один из компонентов (базовый металл-растворитель) сохраняет свою кристаллическую решетку и в ней распределяются атомы других компонентов. Их концентрация может плавно меняться от нуля до определенной величины, называемой пределом растворимости. В зависимости от характера расположения атомов второго компонента различают твердые растворы замещения и внедрения.

В *твердых растворах замещения* атомы второго компонента замещают атомы в узлах кристаллической решетки растворителя. Для

неограниченной растворимости необходимо соблюдение следующих условий: разница атомных радиусов  $\Delta R_{\text{ат}} \leq 10-15\%$ , кристаллические структуры

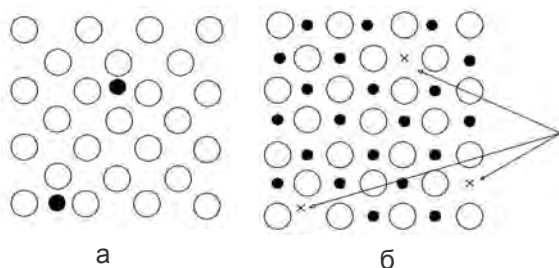


**Рис. 9.5.** Твердые растворы  
а – внедрения; б – вычитания  
(х-недостающие атомы)

компонентов должны быть изоморфны и их физико-химические свойства близки.

В *твердых растворах внедрения* атомы второго компонента находятся в междоузлиях решетки основного металла (рис. 9.5, а), это

атомы относительно малых размеров (углерод, азот, кислород, водород).

Существуют также *твердые растворы вычитания*, которые образуются на базе химических соединений или промежуточных фаз, в решетке которых недостает определенного количества атомов какого-либо из компонентов (рис. 9.5, б).

*Химические соединения* – это фазы, состоящие из двух или более компонентов и имеющие постоянный стехиометрический состав и решетку, отличную от решеток исходных компонентов. Многие химические соединения, образующиеся в сплавах, в отличие от обычных не подчиняются законам валентности и не имеют постоянного состава. Фазовый состав и структура

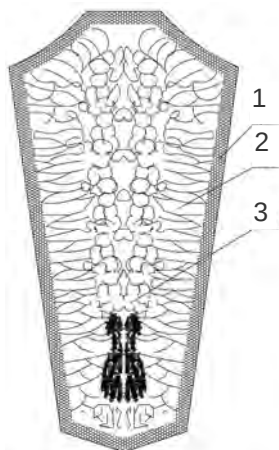


**Рис. 9.6.** Схема строения  
стального слитка:  
1 – зона мелких кристаллов;  
2 – зона столбчатых  
кристаллов; 3 – зона крупных  
равноосных кристаллов

сплавов зависит от их химического состава, режимов и способов их получения и обработки.

При кристаллизации металлов и сплавов образуется слиток, имеющий обычно дендритное (древовидное) строение (рис.9.6). Его структура в общем случае состоит из трех зон. I зона образуется в результате появления на стенках формы большого количества мелких, хаотически ориентированных кристаллов. Не все они способны в дальнейшем расти, поэтому I зона называется *зоной замороженных кристаллов*. Благодаря росту отдельных кристаллов, которые ориентированы по отношению к направлению отвода тепла, образуется II *зона столбчатых кристаллов* или *зона транскристаллизации*. За время формирования I и II зон центральная часть расплава охлаждается ниже температуры плавления. Но поскольку отвод тепла здесь затруднен, зарождаются кристаллы, которые растут медленно, и образуется III *зона объемной кристаллизации*. Чем больше скорость охлаждения, тем больше ширина II зоны. С практической точки зрения, благоприятнее структура зоны I, т.к. зоны II и III делают слиток более хрупким. Для улучшения свойств слитка используют модифицирование.

### 9.2. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов дает представление о строении основных конструкционных сплавов – сталей и чугунов.

**Компоненты, фазы и структурные составляющие сплавов железа с углеродом.** Железо – пластичный металл серебристо-белого цвета. Твердость и прочность железа невысоки при значительной пластичности. Температура плавления –  $1539^{\circ}\text{C}$ , плотность –  $7,83 \text{ г/см}^3$ . Железо имеет полиморфные модификации.

Углерод встречается в природе в виде двух модификации – алмаза и графита. Графит имеет сложную гексагональную кристаллическую решетку. Он является мягким непрочным материалом, но с увеличением температуры прочность графита значительно возрастает. Температура плавления графита  $3500^{\circ}\text{C}$ . С углеродом железо образует химическое соединение цементит и твердые растворы внедрения.

*Цементит* – это карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ . В нем содержится 6,67% углерода (по массе). Имеет сложную ромбическую кристаллическую решетку. Характеризуется очень высокой твердостью (HB 800), крайне низкой пластичностью и хрупкостью.

*Ферритом* называется твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе. При комнатной температуре в феррите содержится не более 0,006% углерода. Благодаря столь малому содержанию углерода свойства феррита совпадают со свойствами железа (низкая твердость и высокая пластичность). Твердый раствор углерода в  $\delta$ -железе, существующий при температуре 1392-1539 °С, также называют ферритом или высокотемпературным ферритом ( $\delta$ -ферритом). Он характеризуется максимальной растворимостью углерода 0,1% при температуре 1499°С.

*Аустенит* – это твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе. Максимальное содержание углерода в аустените составляет 2,14% (при температуре 1147°С). Аустенит характеризуется высокой пластичностью и низкими прочностью и твердостью (HB 220).

*Перлит* – это эвтектоидная смесь феррита с цементитом. Содержит 0,8% углерода, образуется из аустенита при температуре 727°С. Перлит имеет пластинчатое строение; он состоит из чередующихся пластинок феррита и цементита. Возможно и зернистое строение перлита, когда он состоит из зерен цементита, окруженных ферритом. Зернистый перлит значительно пластичнее пластинчатого, имеет меньшую твердость.

*Ледебурит* представляет собой эвтектическую смесь аустенита с цементитом. Содержит 4,3% углерода, образуется из жидкого сплава при температуре 1147°С. При температуре 727°С аустенит, входящий в состав ледебурита, превращается в перлит и ниже этой температуры представляет собой эвтектоидную смесь перлита с цементитом. Ледебурит обладает высокой твердостью (HB 600-700) и хрупкостью.

*Диаграмма железо-цементит.* Практическое значение имеют сплавы железа с углеродом, содержащие углерода до 6,67% (стали и чугуны). Поэтому рассматривают диаграмму состояния сплавов железа с углеродом только до этой концентрации, т.е. фактически рассматривается диаграмма железо-цементит ( $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ ). На рис.9.7 приведена диаграмма состояния сплавов железа с цементитом.

На горизонтальной оси диаграммы указано содержание углерода – от 0 до 6,67%. Левая вертикальная ось соответствует 100% содержанию железа. На ней указаны значения температур плавления железа и его полиморфных превращений. Правая вертикальная ось соответствует 100% содержанию цементита.

Линия ABCD диаграммы является линией *ликвидус*. При температуре ликвидуса начинается кристаллизация: на участке АВ – феррита, ВС – аустенита и CD – первичного цементита. Линия АНЖЕСF является линией *солидуса* – конца затвердевания расплава.

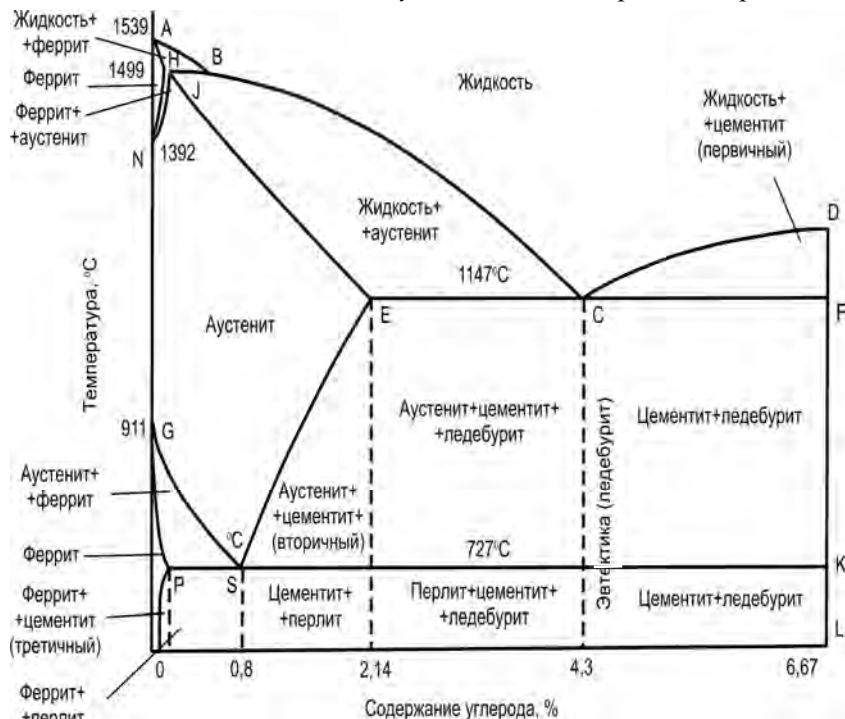


**Рис. 9.7.** Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

Главная роль на диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов отводится ее левой части – сталям (до 2,14%). В результате кристаллизации расплавов, соответствующих составам сталей, образуется аустенит; при понижении температуры аустенит претерпева-



ет превращения, связанные с изменением кристаллической решетки (– переход  $\gamma$ -железа в  $\alpha$ -железо), и с уменьшением растворимости углерода с понижением температуры.

В точке S, соответствующей содержанию углерода 0,8%, при температуре 727°C аустенит полностью распадается, образуется перлит. Сталь, содержащую 0,8% углерода, называют *эвтектоидной*. Ее структура состоит из перлита (рис. 9.8). Сталь, содержащую менее 0,8% углерода, называют *доэвтектоидной*, а сталь с содержанием более 0,8% углерода – *заэвтектоидной*. В доэвтектоидной стали при полном охлаждении получается структура, состоящая из равномерно распределенных зерен перлита и феррита. В заэвтектоидной стали при медленном охлаждении образуется структура, состоящая из перлита и вторичного цементита. При этом вторичный цементит расположен в виде тонкой сетки по границам бывших аустенитных зерен.

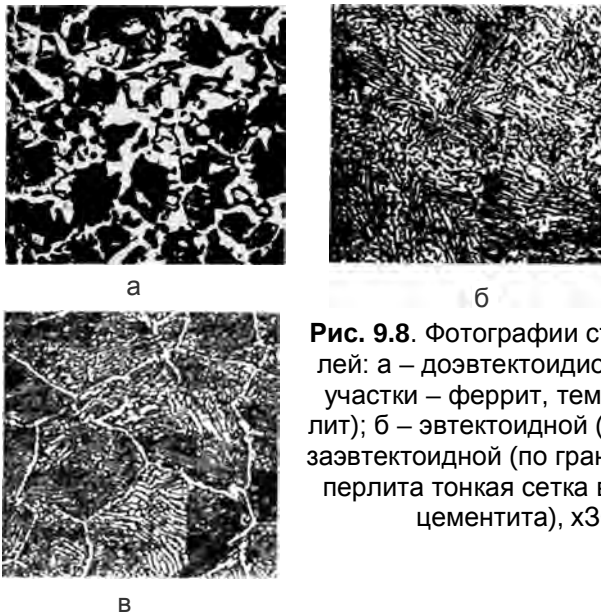


**Рис. 9.8.** Фотографии структур сталей: а – доэвтектоидной (светлые участки – феррит, темные – перлит); б – эвтектоидной (перлит); в – заэвтектоидной (по границам зерен перлита тонкая сетка вторичного цементита), х300

Сплав, содержащий до 0,02% углерода, не имеет перлита в структуре после завершения всех превращений. Такой сплав часто называют *техническим железом*. Структура технического железа

представляет собой зерна феррита или феррит с небольшим количеством третичного цементита.

Линия *GSE* диаграммы называется линией верхних критических точек или линией начала превращения аустенита. Линия *PSK* диаграммы (температура 727°C) называется линией нижних критических точек или линией перлитного превращения.

Рассмотрим превращения в чугунах. Точка *C* (4,3% углерода) представляет собой эвтектическую точку. Она соответствует температуре 1147 °С, при которой кристаллизуется сплав и выделяются кристаллы аустенита и первичного цементита, образуя эвтектическую смесь - ледобурит.

Чугун, содержащий 4,3% углерода, называется *эвтектическим*. Чугуны, содержащие менее 4,3% углерода, называют *доэвтектическими*. В доэвтектическом чугуне образуется структура, состоящая из ледобурита, перлита и вторичного цементита.

Чугуны, содержащие более 4,3% углерода, называют *заэвтектическими*. Структура заэвтектических чугунов состоит из ледобурита, перлита и первичного цементита.

Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов позволяет установить температурные режимы кристаллизации сталей и чугунов, режимы горячей обработки давлением (ковки, прокатки, штамповки), режимы термообработки и др.

### 9.3. Углеродистые и легированные стали

**Состав стали.** Сталь – железоуглеродистый сплав ( $C < 2,14\%$ ) включающий ряд примесей, влияющих на ее структуру и свойства. В зависимости от химического состава стали, разделяют на *углеродистые и легированные*. Решающее влияние на механические свойства углеродистых сталей оказывает содержание углерода, легированных сталей – легирующие примеси.

Углерод – важнейший компонент стали. С увеличением содержания углерода прямо пропорционально возрастает количество цементита – наиболее твердой и хрупкой составляющей стали. Соответственно уменьшаются пластичность и вязкость, относительное удлинение (рис. 9.9), ударная вязкость и трещиностойкость. До содержания углерода 0.55-0.65% возрастает предел выносливости, при большем - снижается. Примеси марганца и кремния раскисляют

сталь, т.е. выводят оксиды металлов и способствуют предотвращению хрупкого разрушения стали при горячей пластической деформации. При этом марганец в количестве до 0,8% заметно повышает, прочность стали, а кремний ( $<0,37\%$ ) – предел текучести.

Сера, образуя сульфид железа, способствует при обработке, стали прокаткой или ковкой ( $1000-1200^{\circ}\text{C}$ ) возникновению надрывов и трещин (*горячеломкость*). Сернистые включения снижают ударную вязкость, и пластичность стали, ухудшают ее свариваемость и коррозионную стойкость. В обычных углеродистых сталях содержание серы ограничивают до 0,05%, в качественных – до 0,04%, в высококачественных – до 0,015-0,025%. Вместе с тем в т.н. автоматных сталях, предназначенных для обработки резанием на станках-автоматах содержание серы для улучшения обрабатываемости стали увеличивают до 0,15-0,25%.

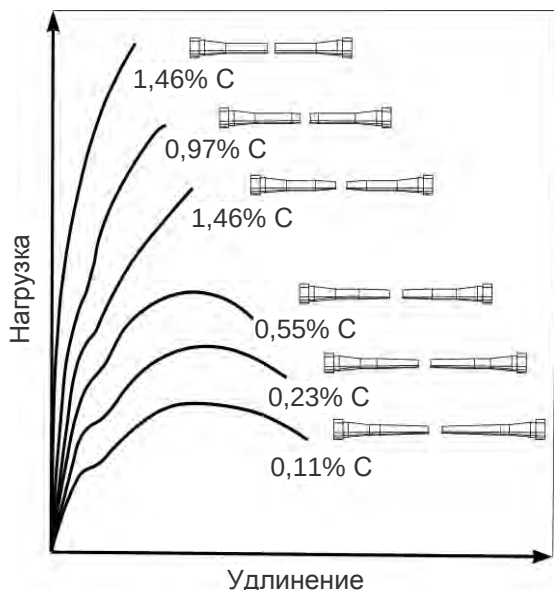


**Рис. 9.9.** Диаграмма растяжения стали с различным содержанием углерода

К вредным примесям относится также фосфор, который, растворяясь в феррите, хотя и увеличивает пределы прочности и упругости сплава, но уменьшает пластичность и вязкость. Содержание фосфора допускается в стали в количестве 0,025-0,045%.

В небольших количествах в стали могут присутствовать газовые примеси – кислород, азот, водород. Они образуют

хрупкие неметаллические включения в виде оксидов или находятся в свободном виде в трещинах, раковинах и т.д. Особенно вредным является растворенный в стали водород, который повышает хруп-

кость стали и приводит к образованию т.н. *флокенов* – тончайших трещин, резко ухудшающих все ее свойства.

Для получения стали с требуемой структурой и свойствами в ее состав вводят *легирующие элементы*, которые распределяются в твердых растворах и других фазах, изменяя прочность, вязкость и пластичность сплавов, повышая их износостойкость и др. Наиболее часто для получения легированных сталей в ее состав вводят никель, хром, титан, марганец, молибден, алюминий, вольфрам.

Для большинства современных легированных сталей основной фазой является феррит, легированный одним или несколькими элементами. Легирование феррита в особенности марганцем и кремнием увеличивает его предел текучести. Для многих коррозионно-стойких жаропрочных и немагнитных сталей основной составляющей является аустенит.

Легирующие элементы, растворяясь в  $\gamma$ -железе, повышают прочность аустенита как при нормальных так и высоких температурах. При повышенном содержании в стали Ni или Mn аустенит может существовать и при низких температурах.

**Способы производства стали.** Сталь получают с помощью мартеновского, конвертерного и электроплавильного способов.

При *мартеновском способе* сталь получают в мартеновских печах, в плавильном пространстве которых сжигается газ или мазут, а в специальных камерах – регенераторах подготавливаются поступающие в печь воздух и газообразное топливо за счет аккумулированного тепла отходящих продуктов горения. Шихта включает чугуны и металлический лом – скрап или жидкий чугун, скрап и железную руду. Процесс получения стали заключается в плавлении шихты, при котором образуется большое количество закиси железа, окислении углерода и других примесей закисью железа и раскислении – восстановления железа из закиси добавками ферросилиция, ферромарганца или алюминия.

*Конвертерный способ* производства стали, заключается в продувке воздуха или кислорода через чугун, залитый в конвертер (рис.9.9). После окончания процесса конвертер поворачивают горизонтально, прекращают дутье, проверяют состав стали и выливают ее в ковш. Распространение получил *кислородно-конвертерный способ*, при котором дутье осуществляется чистым кислородом. Кислородно-конвертерный способ характеризуется высокой произ-

водительностью, не требует больших капитальных затрат топлива. Коэффициент использования теплоты при этом способе составляет около 70%.

Наиболее совершенным из применяемых является *электроплавильный способ* получения стали. В электрических печах (рис. 9.12) выплавляют качественную сталь, характеризующуюся высокой чистотой и хорошей раскисленностью. Основным исходным материалом для электровыплавки стали, является стальной лом.

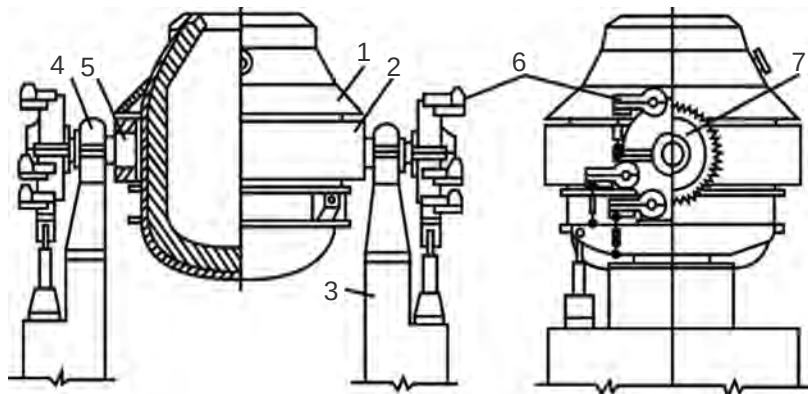


**Рис. 9.10.** Схема кислородного конвертера: 1 – защитный кожух; 2 – опорное кольцо; 3 – опорная станина; 4 – опорный подшипник; 5 – цапфа; 6 – навесной электродвигатель с редуктором; 7 – ведомое зубчатое колесо

Электроплавка производится в дуговых (рис. 9.11) и индукционных печах. В дуговых печах нагрев металла идет за счет теплоты, выделяемой электрической дугой, образующейся между электродом и расплавленным металлом, в индукционных – за счет токов высокой частоты.

Прогрессивным является способ получения стали с помощью *дуплекс-процесса*, когда жидкий чугун перерабатывают в сталь в конвертерах, а затем сталь в электропечах доводят до заданного химического состава.

К прогрессивным методам получения стали, относятся электрошлаковый, плазменно-дуговой и электронно-лучевой переплавы. При *электрошлаковом переплаве* высококачественные легированные стали, получают из слитков обычной стали, которые плавятся

за счет теплоты, выделяемой при прохождении через них электрического тока. Расплавленный металл проходит через слой жидкого шлака и очищается от вредных примесей и газов. При *плазменно-дуговом переплаве* источником теплоты служит плазменная дуга, а *электронно-лучевом* – поток электронов, излучаемых высоковольтной кобальтовой пушкой с созданием в плавильном пространстве

глубокого вакуума.

Эффективно получение стали прямым восстановлением из руд, минуя доменный процесс. Полуфабрикатом для производства стали, при этом способе, служит губчатое железо, получаемое во вращающихся или шахтных печах, которое подвергается дроблению и отделению от пустой породы. При прямом восстановлении железа из руд отпадает необходимость в коксохимическом производстве – основном при доменном процессе, существенно повышается производительность.

Сталь, выпущенная из печей, заливается в специальные чугунные формы – изложницы

– или поступает на непрерывное литье. При непрерывной разливке струя расплавленного металла поступает сначала в кристаллизатор, охлаждаемый водой, а затем в зону вторичного охлаждения и автоматически разрезается на слитки необходи-

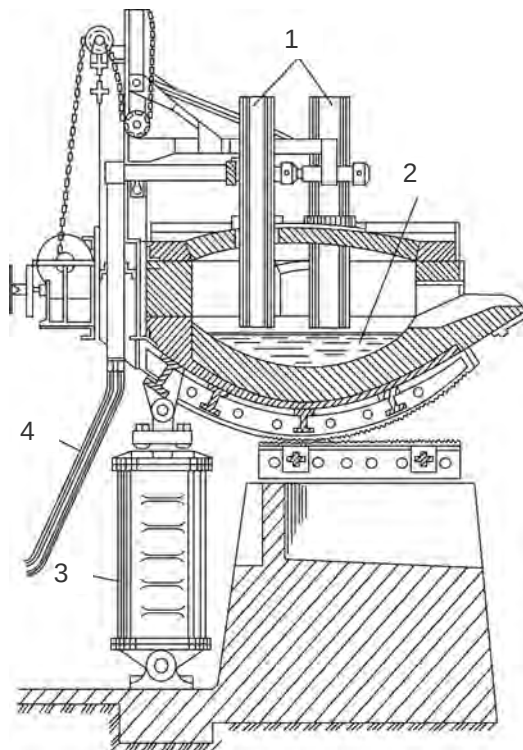


**Рис. 9.11.** Дуговая электрическая печь для плавки стали: 1 – электроды; 2 – ванна; 3 – механизм для поворачивания ванны; 4 – электропривод

мой длины. Непрерывное литье по сравнению со штучным позволяет повысить производительность труда, качество стали, сократить отходы литейного производства.

**Углеродистые стали.** В зависимости от содержания углерода стали разделяют на низкоуглеродистые (до 0,25 %С), среднеуглеродистые (0,25-0,6%С) и высокоуглеродистые (более 0,6%С).

По назначению стали классифицируются на конструкционные, инструментальные и специального назначения. По способу производства различают стали, выплавляемые в мартеновских и электропечах, а также в кислородных конвертерах.

Углеродистые стали, полностью раскисленные после выплавки, называют *спокойными (сп)*, раскисленные частично – *полуспокойными (пс)* и *кипящими (кп)*. Спокойные стали затвердевают без заметного выделения газов. По сравнению с полуспокойными и кипящими сталями они характеризуются лучшими прочностными свойствами, но меньшим выходом металла при прокатке и более высокой стоимостью.

В зависимости от содержания вредных примесей фосфора и серы углеродистые стали делят на сталь обыкновенного качества и качественную. Сталь *обыкновенного качества* применяется для изготовления строительных конструкций, арматуры, крепежных деталей, листового проката, труб, заклепок и т.д.

В сталях обыкновенного качества содержится не более 0,05%S и 0,04% Р. Их изготавливают в мартеновских печах и кислородных конвертерах. При маркировке сталей обыкновенного качества кроме букв “Ст” указывают номер стали, в зависимости от ее химического состава и степень раскисления. С повышением условного номера стали увеличивается содержание углерода.

Химический состав для некоторых углеродистых сталей обыкновенного качества в соответствии с нормами ГОСТ 380-94 приведен в табл.9.1.

*Качественные углеродистые стали* выплавляют в электропечах, кислородных конвертерах и мартеновских печах. К ним предъявляют более жесткие требования по содержанию примесей. Влияние основных примесей на свойства углеродистых сталей показано в табл. 9.2.

Химический состав некоторых углеродистых сталей  
обыкновенного качества

| Марки<br>стали | Содержание элементов в % |                 |                     |             |      |                     |        |      |
|----------------|--------------------------|-----------------|---------------------|-------------|------|---------------------|--------|------|
|                | угле-<br>род             | марга-<br>нец   | крем-<br>ний        | фос-<br>фор | сера | хром<br>не<br>более | никель | медь |
| БСт0           | не<br>более<br>0,23      | -               | -                   | 0,07        | 0,06 | -                   | -      | -    |
| БСт1кп         | 0,06...<br>0,12          | 0,25...<br>0,50 | не<br>более<br>0,05 | 0,04        | 0,05 | 0,3                 | 0,3    | 0,3  |
| БСт1сп         | 0,06...<br>0,12          | 0,25...<br>0,50 | 0,12...<br>0,3      | 0,04        | 0,05 | 0,3                 | 0,3    | 0,3  |
| БСтГ1пс        | 0,06...<br>0,12          | 0,7...<br>1,1   | 0,15<br>max         | 0,04        | 0,05 | 0,3                 | 0,3    | 0,3  |
| БСт2сп         | 0,09...<br>0,15          | 0,25...<br>0,5  | 0,12...<br>0,3      | 0,04        | 0,05 | 0,3                 | 0,3    | 0,3  |
| БСт3кп         | 0,14...<br>0,22          | 0,3...<br>0,6   | 0,07<br>max         | 0,04        | 0,05 | 0,3                 | 0,3    | 0,3  |
| БСт3сп         | 0,14...<br>0,22          | 0,4...<br>0,65  | 0,12...<br>0,3      | 0,04        | 0,05 | 0,3                 | 0,3    | 0,3  |
| БСт4сп         | 0,18...<br>0,27          | 0,4...<br>0,7   | 0,12...<br>0,3      | 0,04        | 0,05 | 0,3                 | 0,3    | 0,3  |

Качественные углеродистые стали маркируют цифрами, указывающими содержание углерода в сотых долях процента. Их поставляют по химическому составу и механическим свойствам (ГОСТ 1050-88). В них должно содержаться не более 0,04%S и 0,035%P.

Химический состав и механические свойства некоторых марок качественных сталей приведен в табл. 9.3

**Легированные стали.** К легированным относятся стали содержащие легирующие примеси, то есть специально введенные для улучшения свойств элементы: хром (Х), никель (Н), молибден (М), вольфрам (В), кремний (С), марганец (Г), медь (Д), фосфор (П), титан (Т), ванадий (Ф), Р – бор, К – кобальт, Ю – алюминий, Б – ниобий.



Таблица 9.2

Влияние основных компонентов на некоторые свойства стали

| Компонент | Предел прочности при растяжении | Предел текучести | Относительное удлинение | Твердость | Ударная вязкость | Свариваемость | Хладноломкость | Красноломкость | Коррозионная стойкость |
|-----------|---------------------------------|------------------|-------------------------|-----------|------------------|---------------|----------------|----------------|------------------------|
| Углерод   | ++                              | +                | --                      | ++        | -                | -             | 0              | 0              | 0                      |
| Марганец  | +                               | +                | -                       | +         | +                | 0             | 0              | -              | +                      |
| Кремний   | +                               | +                | -                       | +         | --               | -             | 0              | -              | -                      |
| Никель    | +                               | +                | 0                       | +         | +                | 0             | 0              | 0              | +                      |
| Хром      | +                               | +                | 0                       | +         | +                | 0             | 0              | 0+             | +                      |
| Медь      | 0                               | 0                | 0                       | 0         | 0                | 0             | 0              | 0              | ++                     |
| Ванадий   | +                               | +                | -                       | +         | 0                | +             | 0              | --             | +                      |
| Молибден  | +                               | +                | -                       | +         | 0                | +             | 0              | -              | +                      |
| Титан     | +                               | +                | 0                       | +         | -                | +             | 0              | 0              | 0                      |
| Фосфор    | ++                              | +                | --                      | +         | --               | -             | ++             | 0              | +                      |
| Сера      | -                               | -                | 0                       | -         | -                | 0             | 0              | +              | 0                      |

**Условные обозначения:** «++» – сильно увеличивает; «+» – увеличивает; «--» – сильно уменьшает; «-» – уменьшает; 0 – не оказывает заметного влияния.

Марка легированной стали характеризует ее приближенный химический состав: цифры до букв показывают среднее содержание углерода, увеличенное в 100 раз; цифры после букв – содержание легирующей добавки в процентах, например, марка 09Г2СД расшифровывается так: углерода 0,09 %, марганца до 2%, кремния до 1%, меди до 1%.

При маркировке инструментальных сталей вначале ставится цифра, означающая содержание углерода в десятых долях процента. Начальную цифру опускают, если содержание углерода более 1%.

Например, сталь 3Х2В8Ф содержит 0,3-0,4% С; 0,2-2,7% Cr; 7,5-8,5%W; 0,2-0,5%V; сталь 5ХНМ – 0,5-0,55% С; 0,5-0,8% Cr; 1,4-

## 9. Металлические материалы

1,8% Ni; 0,19-0,30% Mo; ХВГ – 0,9-1,05% C; 0,9-1,2% Cr; 1,2-1,6%W; 0,8-1,1%Mn.

Таблица 9.3

Химический состав и механические свойства качественных углеродистых сталей

| Мар-<br>ка<br>ста-<br>ли | Массовая доля элементов, %<br>не более |                 |                 |      | Механические свойства<br>не менее     |                                                                  |                                                      |                                         |
|--------------------------|----------------------------------------|-----------------|-----------------|------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                          | C                                      | Mn              | Si              | Cr   | Пре-<br>дел<br>теку-<br>чести,<br>МПа | Времен-<br>ное со-<br>про-<br>тивле-<br>ние раз-<br>рыву,<br>МПа | Отно-<br>ситель-<br>ное<br>удли-<br>не-<br>ние,<br>% | Отно-<br>ситель-<br>ное<br>суже-<br>ние |
| 08                       | 0,05...<br>0,65                        | 0,35...<br>0,65 | 0,17...<br>0,37 | 0,10 | 196                                   | 320                                                              | 33                                                   | 60                                      |
| 10                       | 0,07...<br>0,14                        | 0,35...<br>0,65 | 0,17...<br>0,37 | 0,15 | 205                                   | 330                                                              | 31                                                   | 55                                      |
| 15                       | 0,12...<br>0,19                        | 0,35...<br>0,65 | 0,17...<br>0,37 | 0,25 | 225                                   | 370                                                              | 27                                                   | 55                                      |
| 20                       | 0,17...<br>0,24                        | 0,35...<br>0,65 | 0,17...<br>0,37 | 0,25 | 245                                   | 410                                                              | 25                                                   | 55                                      |
| 30                       | 0,27...<br>0,35                        | 0,50...<br>0,80 | 0,17...<br>0,37 | 0,5  | 295                                   | 490                                                              | 21                                                   | 50                                      |
| 40                       | 0,37...<br>0,45                        | 0,50...<br>0,80 | 0,17...<br>0,37 | 0,25 | 335                                   | 570                                                              | 19                                                   | 45                                      |
| 50                       | 0,47...<br>0,55                        | 0,50...<br>0,80 | 0,17...<br>0,37 | 0,25 | 375                                   | 630                                                              | 14                                                   | 40                                      |
| 60                       | 0,57...<br>0,65                        | 0,50...<br>0,80 | 0,17...<br>0,37 | 0,25 | 400                                   | 680                                                              | 12                                                   | 35                                      |

Некоторые группы сталей имеют дополнительные обозначения. Например, марки автоматных сталей начинаются с буквы "А", подшипниковых – "Ш", электротехнических – "Э".

В зависимости от содержания легирующих добавок различают *низколегированные* (до 2,5%), *среднелегированные* (2,5-10) и *высоколегированные* (более 10%) стали. Введение легирующих элементов изменяет механические, физические и химические свойства стали. Например, введение хрома способствует повышению прочности

и износостойкости, а марганца – твердости, прочности, свариваемости, кремния – твердости, упругости, меди – коррозионной стойкости. Большинство легированных сталей приобретает нужные физико-механические свойства только после термической обработки.

По назначению легированные стали разделяют на конструкционные, инструментальные, стали со специальными физико-механическими свойствами. Состав и назначение некоторых видов легированных сталей приведены в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Характеристика конструкционных легированных сталей

| Марка стали        | Назначение           | Степень легирования | Содержание элементов |      |      |      |         |
|--------------------|----------------------|---------------------|----------------------|------|------|------|---------|
|                    |                      |                     | C                    | V    | Cr   | Mo   | Прочие  |
| 09Г2               | Строительная         | Низколегированная   | 0,09                 | -    | -    | -    | 1,6 Mn  |
| 15ГФ               | Машино-строительная  | Среднелегированная  | 0,15                 | 0,05 | -    | -    | 1,0 Mn  |
| 30ХРА              |                      |                     | 0,3                  | -    | 0,15 | -    | 0,003 В |
| 40ХФА              |                      |                     | 0,4                  | 0,15 | 1,0  | -    | -       |
| 18Х2Н4МА           |                      |                     | 0,18                 | -    | 1,5  | 0,35 | 4,2 Ni  |
| 38Х2МЮА            |                      |                     | 0,38                 | -    | 1,5  | 0,20 | 0,9 Al  |
| 0,8Ф <sub>кп</sub> | Для глубокой вытяжки | Низколегированная   | ≤0,08                | 0,03 | -    | -    | -       |
| 0,8Ю               |                      |                     | ≤0,08                | -    | -    | -    | 0,05 Al |
| 55С2               | Рессорно-пружинная   |                     | 0,55                 | -    | -    | -    | 1,7 Si  |
| 50ХФА              |                      |                     | 0,50                 | 0,15 | 1,0  | -    | -       |

Для низколегированных конструкционных сталей в зависимости от гарантированных характеристик установлены категории.

Выбирая марки стали и категории их поставки, учитывают степень ответственности и условия эксплуатации стальных конструкций. В самых тяжелых условиях работают сварные конструкции

при низких отрицательных температурах, а также под действием динамических вибрационных или подвижных нагрузок.

К легированным сталям с особыми физическими и химическими свойствами относятся жаростойкие, жаропрочные, коррозионно-стойкие, износоустойчивые и магнитные стали.

**Строительные стали.** Строительные стали входят в группу конструкционных сталей, предназначенных для изготовления конструктивных элементов и имеющих высокую прочность и пластичность, достаточное сопротивление ударным нагрузкам, вязкость. В ряде случаев для конструкционных сталей необходимы достаточная коррозионная стойкость, усталостная прочность, износостойкость, стойкость к хрупкому разрушению. Кроме соответствующих механических свойств, конструкционные стали должны иметь и необходимые технологические свойства – способность свариваться, обрабатываться давлением и резанием. В группу конструкционных входят автоматные, пружинно-рессорные, подшипниковые, износо-стойкие, жаропрочные, жаростойкие и некоторые другие виды сталей.

Строительные стали применяют для изготовления металлических конструкций и сооружений, трубопроводов, армирования железобетона. К ним относится ряд марок углеродистых сталей обыкновенного качества и низколегированных.

Строительная сталь поставляется в виде листов, различных видов фасонного и широкополосного универсального проката, гнутых профилей и др.

Стальной прокат получают путем *обработки металлов давлением*, основанной на их способности к пластической деформации. При пластическом деформировании изменяется не только форма металлов и их структура, происходит вытягивание зерен, их измельчение. Обработка металлов давлением осуществляется механической обработкой металлов с помощью прокатки, волочения, прессования,ковки и штамповки. Эти способы обработки основаны на использовании пластической деформации холодного или нагретого металла под воздействием валков, штампов, бойков и др.

Пластическая деформация – это деформация материала, сохраняемая после снятия нагрузки. Обработка металлов давлением в холодном состоянии приводит к *наклепу* – повышению предела прочности и твердости при снижении пластичности и ударной вяз-

кости. Значительное влияние на деформационное упрочнение оказывает температура. С повышением температуры пластичность непрерывно увеличивается, а сопротивление деформированию уменьшается. По мере нагрева идет процесс перекристаллизации и восстановления прежней структуры материала. Сопротивление металлов деформированию возрастает с увеличением скорости деформации.

*Прокаткой* (рис. 9.12, а) называется обработка металлов давлением, при которой процесс деформации осуществляется сдавливанием между

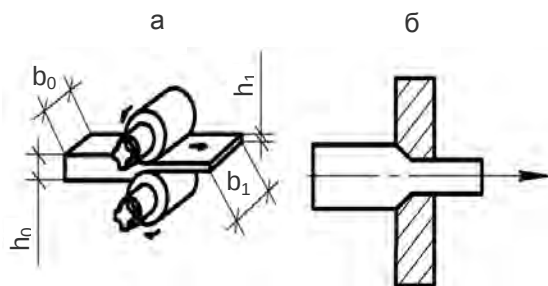


**Рис. 9.12.** Обработка металлов давлением: а– прокатка; б– волочение

между вращающимися цилиндрами (валками) прокатного стана. Исходными материалами для получения прокатных изделий служат литые заготовки, а готовой продукцией – различные профили.

*Волочение* (рис. 9.12, б) – обработка металлов давлением путем протягивания проволоки, прутка или трубы через отверстие матрицы с сечением, меньшим исходного сечения заготовки. С помощью волочения изделия приобретают заданную геометрическую форму, точные размеры, чистую поверхность. Волочение металлов производится обычно в холодном состоянии на специальных волочильных станах.

*Прессование* – продавливание пластичных металлов, находящихся в контейнере, через выходное отверстие матрицы. Этот метод обработки давлением применяется в основном для изготовления изделий различных профилей из цветных металлов, а в некоторых случаях и из стали.

*Ковка и штамповка* – процессы обжатия металлической заготовки с целью получения изделий заданной формы между двумя бойками или в штампах. При ковке и штамповке детали получают путем деформирования горячих (а при штамповке и холодных) заготовок нагрузкой с применением молотов или прессов.

Основным способом получения строительных металлических изделий является прокатка. На современном металлургическом заводе прокатка осуществляется двумя способами. При первом исходным материалом служат стальные слитки, которые перерабатываются сначала на обжимных станах в заготовки, а затем на специализированных прокатных станах в готовые изделия. При втором способе, применяемом с середины XX в., прокатка исходной заготовки заменяется непрерывным литьем (разливкой) на специальных машинах. При таком способе повышается качество проката, устраняются отходы.

Прокатные стальные изделия разделяют на четыре группы: сортовую и листовую сталь, специальные виды проката, трубы. Из прокатных изделий собирают самые разнообразные решетчатые и сплошные конструкции: колонны, балки, бункера, мачты, башни, трубопроводы, резервуары и др.

*Сортовая сталь* включает (рис. 9.13) профили массового потребления (круглую, квадратную, угловую сталь, ленту, проволоку, швеллеры, двутавровые балки) и профили специального назначения (рельсы и др.).

Из сортовой стали в строительстве особенно широко применяют уголкового профиля, двутавры, швеллеры. *Уголкового профиля* может быть двух типов: равнополочный и неравнополочный. Наиболее легкие уголкового профиля имеют размеры полок  $20 \times 20$  мм и толщину 3 мм ( $20 \times 3$ ), наиболее тяжелые, соответственно,  $250 \times 250$  мм и 30 мм ( $250 \times 30$ ).

*Двутавры и швеллеры* выбирают по номерам, соответствующим их высоте в миллиметрах. Номера двутавров изменяются в диапазоне от 10 до 60, швеллеров – от 5 до 40. Двутавры прокатывают длиной до 19 м, швеллеры – до 18 м. Их применяют обычно как балки, работающие на изгиб и осевую нагрузку. Швеллеры отличаются от двутавров сдвинутой к краю полки стенкой. Форма швеллеров упрощает прикрепление их к стенкам других элементов. Швеллеры широко используют как прогоны покрытий промышленных зданий.

В последние годы металлургическая промышленность стала поставлять строительству облегченные двутавровые балки и швеллеры, главным отличием которых являются более тонкие стенки.

*Листовая сталь* разделяется в зависимости от толщины листов на толстолистовую (4-16 мм), тонколистовую (0,2-4 мм), универсальную широкополосную (4-60 мм), слябы (плиты 60-200 мм), рулонную и рифленую.

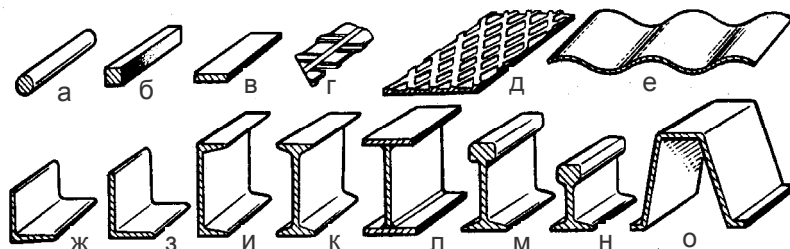


**Рис. 9.13.** Сортамент сталей: а – круглая; б – квадратная; в – полосовая; г – периодического профиля; д – рифленая; е – волнистая; ж – угловая равнобокая; з – угловая неравнобокая; и – швеллер; к – двутавр; л – двутавр сварной; м – рельсы крановые; н – рельсы железнодорожные; о – шпунтовая свая

Толстолистовая сталь изготавливается в виде листов с шириной до 8500 мм и длиной до 12 м. Наиболее широко в строительстве применяют стальные листы толщиной до 40 мм. Листы тонколистовой стали имеют длину до 4 м, ширину – 600-1400 мм. Ее применяют при изготовлении гнутых тонкостенных профилей и профилированного настила. Изготовление гнутых профилей позволяет существенно упростить технологию производства деталей и экономить до 10% металла. Профилированный настил применяется для устройства легкой и удобной в монтаже кровли.

Основным видом специального проката для строительства является *арматурный прокат* (рис. 9.14).

Для возведения башен, мачт, опор ВЛ и других решетчатых конструкций широко используются *металлические трубы*. По способу изготовления их разделяют на бесшовные горяче- и холоднодеформированные и электросварные с продольным прямым или спиральным швом. Наряду с круглыми сварными трубами для стальных конструкций применяют квадратные и прямоугольные гнутосварные трубы.

Выбор сталей для строительных конструкций базируется в основном на оценке четырех основных характеристик: предела текучести  $\sigma_T$ , предела прочности при растяжении  $\sigma_B$  (временного сопротивления), относительного удлинения  $\delta$  и ударной вязкости при отрицательной температуре. Все стали так же, как и другие сплавы для металлических конструкций, по уровню основных механических свойств, определенных при испытаниях на растяжение, принято делить на классы.

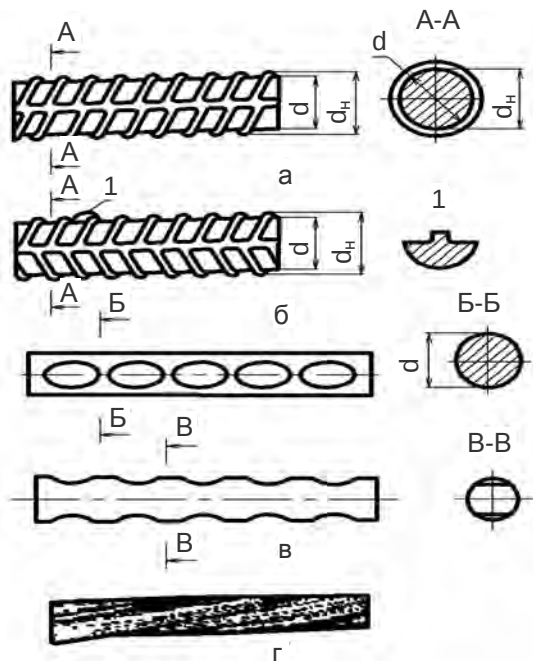


**Рис. 9.14.** Арматурная сталь: А – класс А300; б – класс А-400; в – проволока периодического профиля; г – семипроволочная арматурная прядь

При обозначении класса сталей применяемой для изготовления проката (ГОСТ 27772-88) для строительных конструкций, буква “С” означает “сталь строительная”, цифры – предел текучести в МПа, буквы (К или Т) – вариант химического состава и термическое упрочнение. Фасонный прокат изготавливают из сталей С235, С245, С255, С275, С285, С345, С345К, С375; листовой универсальный



прокат и гнутые профили – из сталей указанных выше классов, а также из сталей С390, С390К, С440, С590, С590К.

Для каждого класса строительной стали нормируется химический состав (табл. 9.5). Для фасонного, листового и широкополосного универсального проката нормируются также механические свойства (табл. 9.6; 9.7).

Таблица 9.5

Химический состав строительных сталей (%)

| Наименование стали | Содержание отдельных элементов, %, не более |         |           |       |       |     |     |     |           |
|--------------------|---------------------------------------------|---------|-----------|-------|-------|-----|-----|-----|-----------|
|                    | C                                           | Mn      | Si        | S     | P     | Cr  | Ni  | Cu  | V         |
| С 235              | 0,22                                        | 0,60    | 0,05      | 0,05  | 0,04  | 0,3 | 0,3 | 0,3 | -         |
| С 245              | 0,22                                        | 0,65    | 0,05-0,15 | 0,05  | 0,04  | 0,3 | 0,3 | 0,3 | -         |
| С 255              | 0,22                                        | 0,65    | 0,15-0,30 | 0,05  | 0,04  | 0,3 | 0,3 | 0,3 | -         |
| С 345              | 0,12                                        | 1,3-1,7 | 0,8       | 0,04  | 0,035 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | -         |
| С 390              | 0,18                                        | 1,2-1,6 | 0,6       | 0,04  | 0,035 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,07-0,12 |
| С 440              | 0,20                                        | 1,3-1,7 | 0,6       | 0,04  | 0,035 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,08-0,14 |
| С 540              | 0,15                                        | 1,3-1,7 | 0,4-0,7   | 0,035 | 0,035 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,07-0,15 |

Каждому классу строительной стали соответствуют определенные марки. В соответствии с ГОСТ 27772-88 стали С 235 соответствует сталь марки Ст3кп2, С 245 – Ст3пс5 и Ст3сп5; С 255 – Ст3Гпс и Ст3сп5; С 275 – Ст3пс; С 285 – Ст3сп; Ст3Гпс, Ст3Гсп; С 345 – 12Г2С и 09Г2С; С 375 – 12Г2С; С 390 – 14Г2АФ; С 440 – 16Г2АФ; С 590 – 14ГН2МФАЮ.

Важнейшей технологической характеристикой строительных сталей является хорошая *свариваемость* – способность стали свариваться без образования трещин и создавать сварное соединение, которое по качеству не отличается от свойств основного металла. Возможность образования трещин в сварном шве зависит от интервала кристаллизации металла, который в значительной мере определяется содержанием углерода. С увеличением интервала кристал-

## 9. Металлические материалы

лизации возрастает опасность появления горячих трещин в сварном шве. В свариваемых сталях с повышенным содержанием углерода, в связи с процессом распада аустенита при охлаждении, сопровождаемом объемными изменениями, возможно также образование холодных трещин. В связи с опасностью трещинообразования при сваривании в сталях, используемых для изготовления строительных конструкций, содержание углерода не превышает 0,25%.

Таблица 9.6

Механические свойства стали фасонного проката

| Сталь  | Предел<br>теку-<br>чести,<br>МПа | Вре-<br>мен-<br>ное<br>сопро-<br>тивле-<br>ние,<br>МПа | Относи-<br>тельное<br>удлине-<br>ние,<br>% | Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup> |     |     |                                         |
|--------|----------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|-----|-----|-----------------------------------------|
|        |                                  |                                                        |                                            | при темпера-<br>туре, °С             |     |     | после<br>механи-<br>ческого<br>старения |
|        |                                  |                                                        |                                            | -20                                  | -40 | -70 |                                         |
| С 235  | 235                              | 360                                                    | 236                                        | -                                    | -   | -   | -                                       |
| С 245  | 245                              | 370                                                    | 25                                         | -                                    | -   | -   | 29                                      |
| С 255  | 255                              | 380                                                    | 25                                         | 29                                   | -   | -   | 29                                      |
| С 275  | 275                              | 390                                                    | 24                                         | -                                    | -   | -   | 29                                      |
| С 285  | 285                              | 400                                                    | 24                                         | 29                                   | -   | -   | 29                                      |
| С 345  | 345                              | 490                                                    | 21                                         | -                                    | 39  | 34  | 29                                      |
| С 345К | 345                              | 470                                                    | 20                                         | -                                    | 39  | -   | -                                       |
| С 375  | 375                              | 510                                                    | 20                                         | -                                    | 39  | -   | 29                                      |

**Примечание:** Механические свойства приведены для проката с толщиной полки от 4 до 20 мм.(С 235 и С 245) и от 4 до 10 мм для остальных.

Показателем свариваемости стали, является *углеродный эквивалент* ( $C_e$ , %):

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cu}{13} + \frac{V}{14} + \frac{P}{2}, \quad (9.2)$$

где Mn, Si, Cr, Ni, Cu, V, P – содержание в стали соответствующих химических элементов в % по массе.

Углеродный эквивалент строительных сталей не должен превышать 0,45-0,48. Без ограничений свариваются стали с  $C_e \leq 0,25$ .

Важным показателем, характеризующим эксплуатационную надежность строительных сталей является также температура их перехода из вязкого состояния в хрупкое (*порог хладноломкости*). Пе-

реходу в хладноломкое состояние стали способствует содержащейся в ней углерод и фосфор. При этом вредное влияние фосфора проявляется тем заметнее, чем выше содержание углерода в стали.

Таблица 9.7

Механические свойства стали листового и широкополосного универсального проката

| Сталь  | Предел текучести, МПа | Временное сопротивление, МПа | Относительное удлинение, % | Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup> |     |     |                              |
|--------|-----------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-----|-----|------------------------------|
|        |                       |                              |                            | при температуре, °С                  |     |     | после механического старения |
|        |                       |                              |                            | -20                                  | -40 | -70 |                              |
| С 235  | 235                   | 360                          | 20                         | -                                    | -   | -   | -                            |
| С 245  | 245                   | 370                          | 20                         | -                                    | -   | -   | 29                           |
| С 255  | 255                   | 380                          | 20                         | -                                    | -   | -   | -                            |
| С 275  | 275                   | 390                          | 18                         | -                                    | -   | -   | -                            |
| С 285  | 285                   | 400                          | 17                         | 29                                   | -   | -   | -                            |
| С 345  | 345                   | 490                          | 15                         | -                                    | -   | -   | -                            |
| С 345К | 345                   | 470                          | 20                         | -                                    | 39  | -   | -                            |
| С 375  | 375                   | 510                          | 14                         | -                                    | -   | -   | -                            |
| С 390  | 390                   | 540                          | 20                         | -                                    | -   | 29  | -                            |
| С 390К | 390                   | 540                          | 19                         | -                                    | -   | 29  | -                            |
| С 440  | 440                   | 590                          | 20                         | -                                    | -   | 29  | -                            |
| С 590  | 590                   | 685                          | 14                         | -                                    | 34  | -   | -                            |
| С 590К | 590                   | 685                          | 14                         | -                                    | -   | 29  | -                            |

**Примечание:** Механические свойства стали приведены для листов толщиной от 2 до 3,9 мм

Порог хладноломкости сталей возрастает с увеличением их прочности. Хладноломкость стали особенно проявляется при действии динамических нагрузок. Склонность к хрупкому разрушению металлов увеличивается по мере увеличения скорости их деформации. Ему способствуют все факторы, ведущие к увеличению концентрации и развитию напряжению в изделиях и конструкциях.

Строительные стали разделяют на стали без гарантированной хладноломкости до -40°С и стали для металлоконструкций, экс-

пластуемых при температурах ниже  $-40^{\circ}\text{C}$  ( стали “северного” исполнения). Наибольший эффект повышения хладноломкости достигается при использовании термомеханически упрочненного проката.

Для работы при сверхнизких температурах применяют *криогенные стали* при изготовлении емкостей для хранения и перевозки сжиженных газов, имеющих очень низкую температуру кипения (кислород – минус  $183^{\circ}$ , водород – минус  $253^{\circ}\text{C}$ ). Основными материалами для работы в подобных условиях, являются аустенитные стали с повышенным содержанием никеля.

### 9.4. Термическая обработка стали

Изменение структуры и свойств стали достигается путем нагрева до требуемой температуры, выдержки и охлаждения с заданной скоростью до определенной температуры. Первые сведения о применении некоторых видов термической обработки металлов относятся к концу 3 тысячелетия до н.э. (закаленные стальные мечи, найденные в индийских гробницах). Научные основы термической обработки металлов заложил (1868 г.) русский металлург Д.К. Чернов.

При термической обработке стали почти все операции связаны с нагревом до температуры, при которой она полностью или частично приобретает структуру аустенита. При медленном охлаждении аустенит переходит в перлит и образуются структуры феррит + перлит или перлит+цементит. Перлит имеет размер зерен более  $10^{-6}$  м. При быстром охлаждении образуются *сорбит*-смесь цементита с ферритом и *троостит* – высокодисперсная смесь цементита с ферритом. Размер зерен сорбита  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  м, троостита –  $10^{-9}$ - $10^{-10}$  м (рис. 9.15). При резком охлаждении стали образуется пересыщенный раствор углерода в  $\alpha$ -Fe – *мартенсит*, выделяемый в виде тонких игольчатых образований и образующий наиболее твердую и хрупкую структуру стали. Мартенсит – термодинамически неустойчивая фаза, которая при нагреве переходит в более устойчивые структуры – троостит, сорбит и перлит (рис. 9.16).

Термическую обработку стали проводят в тех случаях, когда необходимо повысить ее прочность, твердость, износостойчивость

или упругость либо, наоборот, сделать более мягкой, легче поддающейся механической обработке.

Процессы термической обработки подразделяют на собственно термическую обработку под воздействием только теплоты – закалку, отжиг, отпуск, старение, термомеханическую обработку при комбинированном воздействии теплоты и пластического деформирования; химико-термическую обработку при сочетании воздействия теплоты и изменения химического состава металла.



а

б

в

**Рис. 9.15.** Микроструктура перлита (а), сорбита (б), троостита (в)

Закалка металлов заключается в нагреве их до температуры выше критических точек, т. е. точек на диаграмме состояния, при которых качественно изменяется фазовое состояние сплавов, последующей выдержке и быстром охлаждении. При закалке углеродистых и низколегированных сталей обычно преследуется цель получить игольчатую структуру мартенсита.



**Рис. 9.16.** Микроструктура мартенсита

При охлаждении в воде аустенит сохраняется до температуры примерно 200°C и затем мгновенно превращается в мартенсит.

Дозавтектоидные стали для закалки нагревают до температуры на 30...50°C выше температуры линии BSE на диаграмме (рис. 9.7). В этом случае сталь с исходной структурой перлит + феррит нагревается до аустенитного состояния и при охлаждении со скоростью больше

критической получается мартенсит. Такой вид термической обработки называется *полной закалкой*.

Заэвтектоидные стали нагревают для закалки на 50-70°C выше температуры линии PSK на диаграмме рис. 9.7. После закалки в структуре заэвтектоидных сталей образуется мартенсит с цементитом и остается небольшое количество остаточного аустенита. Все заэвтектоидные стали подвергают *неполной закалке*.

Время нагрева деталей зависит от конструкции нагревательных устройств. При нагреве в электрических печах оно составляет 0,8-1 мин на 1 мм сечения, в соляной ванне в два раза, а в расплавленном свинце в три-четыре раза выше. Время выдержки выбирают с учетом необходимости полного прогрева деталей и завершения всех фазовых превращений.

В качестве охлаждающих закалочных сред для углеродистых сталей применяют воду и различные водные растворы, а для легированных сталей используют масла и воздух.

Оптимальный способ закалки и выбор режима охлаждения выбирают в зависимости от состава стали, формы и размеров деталей. Чем больше углерода в стали, тем больше объемные изменения и при более низкой температуре происходит превращение аустенита в мартенсит.

Способность стали приобретать высокую твердость в результате закалки называют *закаливаемостью*. С увеличением содержания углерода закаливаемость стали возрастает.

При необходимости обеспечения высокой твердости и повышенной износостойчивости поверхностных слоев стальных изделий при сохранении вязкой сердцевины применяют *поверхностную закалку*. Обычно поверхностной закалке подвергают стали при содержании углерода больше 0.3%. При таком виде закалки поверхностные слои металла нагреваются значительно выше температуры линии BSE (рис.9.7) однако это не приводит к перегреву, учитывая высокую скорость нагрева. Наиболее распространенными методами поверхностной закалки являются нагрев кислородно-ацетиленовым пламенем или газовой горелкой, нагрев в водном электролите при пропускании электрического тока, контактный нагрев электроток, индукционный нагрев токами высокой частоты.

В последние годы расширяется поверхностная термическая обработка изделий с помощью оптических квантовых генераторов

(лазеров). По сравнению с другими видами нагрева *лазерный нагрев* обладает рядом преимуществ: возможностью обработки труднодоступных мест и поверхностей деталей сложной конфигурации; отсутствием коробления и деформации деталей; возможностью передачи энергии луча на большие расстояния и обработки деталей, изготовленных из любых металлических материалов (чугунов и сталей, цветных и твердых сплавов, порошковых металлов), высокой скоростью процесса и др. Применение современных лазерных установок обеспечивают полную механизацию и автоматизацию процесса термической обработки.

Для устранения внутренних напряжений, возникающих при залке сплавов, и достижения наилучшего сочетания прочности и пластичности их подвергают завершающей операции термической обработки – *отпуску*. Различают низкий, средний и высокий отпуск. Температура нагрева при низком отпуске составляет обычно 150 – 200°C, при высоком может достигать 600-650°C. При отпуске стали происходит переход мартенсита в более устойчивые структуры (табл. 9.8).

Таблица 9.8

Примеры применения отпуска

| Сталь              | Вид отпуска | Температура нагрева, °C | Твердость, НВ | Структура после отпуска |
|--------------------|-------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| Высокоуглеродистая | низкий      | 150...200               | 600           | отпущенный мартенсит    |
|                    |             | 200...230               | 580           | игольчатый троостит     |
| Среднеуглеродистая | средний     | 350...450               | 320...425     | троостит                |
|                    |             | 450...500               | 370...400     | троостит и сорбит       |
|                    | высокий     | 600...650               | 230...280     | сорбит                  |

Отпуск применяют для сплавов, в которых при залке происходят полиморфные превращения. Если такие превращения не происходят, вместо отпуска, применяют *старение* – термическую обра-

ботку, при которой происходит распад пересыщенного твердого раствора и, как следствие, изменение свойств закаленных сплавов. Различают старение естественное, искусственное и после пластической деформации. Естественное старение происходит после выдержки стали при нормальной температуре, искусственное в процессе выдержки при повышенных температурах, ускоряющих процессы распада твердого раствора. Ускорение процессов старения достигается также при пластической деформации закаленного сплава. После старения повышается прочность и снижается пластичность сталей. Старение является основным способом упрочнения алюминиевых и медных, а также многих жаропрочных сплавов.

При необходимости уменьшения твердости, повышения пластичности и вязкости металлов, их обрабатываемости применяют операцию *отжига*. Характерной особенностью отжига является медленное охлаждение, достигаемое, например, под слоем песка, золы, шлака и т. п. При отжиге сталей после предварительного нагрева образуется аустенитовая структура, которая при медленном охлаждении переходит в равновесную в соответствии с диаграммой состояния.

Для достижения мелкозернистой однородной структуры с несколько меньшей пластичностью, но с более высокой твердостью, чем после отжига, производят *нормализацию* сплавов, отличительной особенностью которой является охлаждение на воздухе. Нормализация является более простым видом обработки, чем отжиг. Эта операция повышает твердость и позволяет получить более чистую поверхность стали при резании.

*Термомеханическая обработка* металлов включает нагрев, пластическое деформирование и охлаждение металла, совмещенные в единой технологической схеме. Сущность совмещенного процесса состоит в том, что заготовки сразу после окончания горячей обработки давлением (ковки, прокатки) закаливают. При этом не производится специального нагрева заготовок, а используется остаточная теплота после горячего деформирования. В результате экономится топливо для нагрева под закалку, уменьшается потребность в нагревательных печах, сокращается время изготовления деталей и существенно улучшаются механические свойства.



Преимуществом термомеханической обработки является незначительное снижение пластичности стали при значительном увеличении ее прочности.

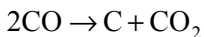
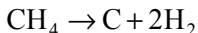
Различают высокотемпературную (ВТМО) и низкотемпературную (НТМО) термомеханическую обработку. При ВТМО сталь нагревают до температуры аустенитного состояния, при этой температуре осуществляют деформацию, а затем подвергают закалке. При НТМО сталь нагревают до аустенитного состояния, выдерживают, а затем охлаждают до 400-600°C и при этой температуре осуществляют обработку давлением и закалку. Низкотемпературная термомеханическая обработка дает более высокое упрочнение, но не снижает хрупкость стали и требует более высокой степени деформации.

Повышение прочности стали при термомеханической обработке объясняется тем, что в результате деформации аустенита происходит дробление его зерен в 2-4 раза по сравнению с закалкой и увеличивается плотность дислокаций.

*Химико-термическая* обработка металлов заключается в насыщении поверхности изделий углеродом, азотом, алюминием и другими элементами. Этому виду обработки подвергают, например, изделия, предназначенные для работы на истирание в сочетании с ударными нагрузками, т. е. в тех случаях, когда они должны характеризоваться высокой твердостью поверхностных слоев при достаточно вязкой сердцевине. В зависимости от особенностей диффундируемого элемента можно воздействовать также на усталостную прочность, повышать сопротивление поверхности металла воздействию внешних агрессивных сред и т.д. Чаще всего применяют *цементацию* – насыщение стали углеродом. Поверхностный слой низкоуглеродистых сталей при цементации науглероживается до 0,8-1,1% С и подвергается термической обработке, в результате которой приобретает структуру мартенсита.

Для цементации обычно используют низкоуглеродистые (0.1-0.8% С), чаще легированные стали. Выбор таких сталей необходим для того, чтобы сердцевина изделий, не насыщающаяся углеродом при цементации, сохраняла высокую вязкость после закалки. Наиболее распространена цементация стали в среде природного газа, содержащего 92-96% метана ( $\text{CH}_4$ ) и некоторое количество оксида углерода ( $\text{CO}$ ).

В процессе цементации идут реакции:



Образуемый атомарный углерод поглощается поверхностью стальных изделий. Этот процесс активизируется при нагревании стали до образования аустенитной структуры.

Для цементации стали, кроме природного газа используют искусственную смесь газов пропана ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) и бутана ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), расплавы смесей солей ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{SiC}$ ), а также смесь древесного угля с карбонатами натрия или бария. В последнем случае изделия обычно помещают в стальные ящики, засыпают цементационной смесью и нагревают до  $900\text{--}950^\circ\text{C}$ . Кислород воздуха, при нагреве с углем, образует оксид углерода, который при наличии железа диссоциирует с образованием углерода.

Кроме цементации, для повышения твердости и коррозионной стойкости стальных изделий применяют азотирование, цианирование и насыщение поверхностных слоев металла хромом, алюминием, цинком и другими элементами. Эти процессы осуществляют в средах, в которых образуются или содержатся соответствующие вещества, насыщающие поверхностный слой металла.

*При азотировании* изделия помещают в печь, где при нагревании разлагается аммиак с образованием атомарного азота, образующего с металлами нитриды. Повышенная твердость азотированного слоя стали сохраняется при нагревании до  $500^\circ\text{C}$ , в то время как цементированного лишь до  $200^\circ$ . Азотирование широко применяют для повышения усталостной прочности конструкционной легированной стали.

*При цианировании* поверхностный слой стали насыщают одновременно углеродом и азотом при температуре  $820\text{--}950^\circ\text{C}$  в расплавленных солях, содержащих группу  $\text{NaCN}$ . Этот процесс по сравнению с цементацией требует меньшего времени и обеспечивает получение при значительно меньших деформациях и с высоким сопротивлением износу и коррозии стальных деталей сложной формы. Применение цианирования сдерживается ядовитостью цианистых солей.

Процесс диффузионного насыщения поверхностных слоев стали различными металлами, называют *диффузионной металллизацией*. Диффузия металлов в железоуглеродистых сплавах идет значительно

нее медленнее и на меньшую глубину, чем газов. Поверхностное насыщение стали металлом проводится при температурах 900-1200°C. К основным разновидностям диффузионной металлизации относятся *алюмирование* и *хромирование* – процессы насыщения поверхности стали соответственно алюминием и хромом. В промышленности внедрены такие процессы *титанирования* (насыщение титаном) и *цинкования* (насыщение цинком). Близкими к процессам диффузионной металлизации являются процессы *борирования* и *силицирования* – насыщения поверхности стали бором и кремнием.

## 9.5. Чугуны

Чугуны – железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода более 2,14%.

Производство чугуна основано на доменном процессе, включающем три стадии: восстановление железа из оксидов, содержащихся в руде, науглероживание железа и шлакообразование. Сырьевыми материалами для получения чугуна являются железные руды, флюсы и кокс.

Железные руды до плавки подвергают предварительной обработке и дроблению, обогащению и окускованию. Обогащают измельченную руду чаще всего магнитной сепарацией. Для удаления песчаных и глинистых частиц руду промывают водой. Мелкозернистые руды окусковывают агломерацией – спеканием на колосниковых решетках агломерационных машин или окатыванием в грануляторе с последующей сушкой и обжигом. Основное топливо при плавлении чугуна – кокс, он является источником тепла и непосредственно принимает участие в науглероживании железа. Флюсы (известняки, доломиты или песчаники) применяют для снижения температуры плавления пустой породы и связывания ее с золой топлива в шлаки.

*Доменная печь* – это вертикальная шахта со стенами из огнеупорного кирпича, размещенными в стальном кожухе (рис.9.17). Сверху в печь послойно загружают подготовленные сырьевые материалы. Вследствие горения кокса при наличии кислорода воздуха, который нагревается в нижней части печи, образуется оксид углерода, восстанавливающий железо из руды и химически взаимодей-

ствующий с ним. Помимо восстановления железа восстанавливаются также кремний, фосфор, марганец и другие примеси.

Расплавленные при температуре 1380-1420°C чугун и шлак выпускают через специальные отверстия (летки). Чугун разливается в формы, а шлак идет на переработку. В доменных печах выплавляют чугун, предназначенный для производства стали, литейный – для

получения разнообразных чугунных изделий, специальные чугуны (ферросилиций, ферромарганец), используемые в производстве стали как раскислители или легирующие добавки.

В зависимости от состава и структуры чугуны подразделяют на две основные группы: серые и белые (рис. 9.18). В *серых чугунах* углерод находится, в основном, в виде графита, в *белых* – цементита  $Fe_3C$ . Для первых характерен излом темно-серого, для вторых матово-белого цвета. Изготавливают также т.н. *половинчатый чугун*, в котором часть углерода находится в виде графита, а часть в виде карбида железа (цементита).

Серые чугуны в зависимости от содержания углерода разделяют на доэвтектические ( $C=2,14-4,3\%$ ), эвтектические ( $4,3\%$ ) и заэвтектические ( $4,3-6,7\%$ ). Наиболее широко применяют доэвтектические чугуны. Состав сплава влияет на его структуру и свойства. В обычном сером чугуне графит находится в форме пластинок. Чем выше со-

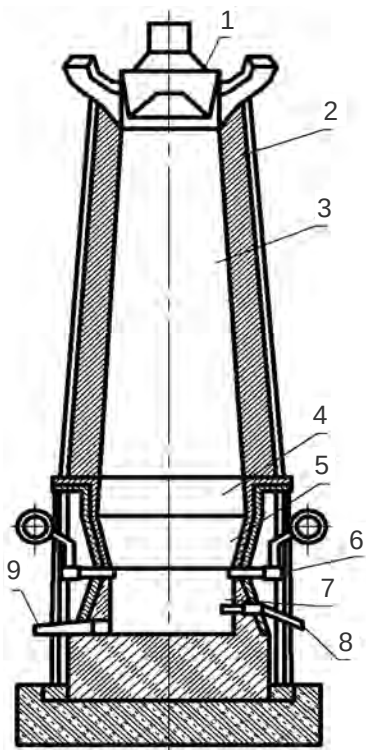


**Рис. 9.17.** Схема доменной печи: 1 – засыпной аппарат; 2 – колошник; 3 – шахта; 4 – распар; 5 – заплечики; 6 – воздушные фурмы; 7 – горн; 8 – отверстие для выпуска шлака; 9 – отверстие для выпуска чугуна

держание в чугуне углерода, тем больше образуется графита и тем ниже его механические свойства.

Серый чугун обладает хорошими литейными качествами в отличие от белого, имеющего очень высокую твердость и хрупкость. Из серого чугуна для строительных целей изготавливают сантехническое оборудование, трубы, плиты для полов, тубинги для туннелей и другие изделия. Маркируют серый чугун буквами С – серый и Ч – чугун. После букв следуют цифры, которые указывают средний предел прочности при растяжении ( $\text{МПа} \times 10^{-1}$ ), например СЧ20 (предел прочности при растяжении 200 МПа). Химический состав и основные свойства серых чугунов приведены в табл. 9.9. (ГОСТ 1412-85).

Таблица 9.9

Химический состав (%) и свойства серых чугунов

| Марка чугуна | $\sigma$ , МПа, не менее | Твердость НВ, не более | C         | Si        | Mn        | P        | S    |
|--------------|--------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|------|
|              |                          |                        |           |           |           | не более |      |
| СЧ 10        | 100                      | 190                    | 3,5...3,7 | 2,2...2,6 | 0,5...0,8 | 0,3      | 0,15 |
| СЧ 15        | 150                      | 210                    | 3,5...3,7 | 2,0...2,4 | 0,5...0,8 | 0,2      | 0,15 |
| СЧ 20        | 200                      | 230                    | 3,3...3,5 | 1,4...2,4 | 0,7...1,0 | 0,2      | 0,15 |
| СЧ 25        | 250                      | 245                    | 3,2...3,4 | 1,4...2,4 | 0,7...1,0 | 0,2      | 0,15 |
| СЧ 30        | 300                      | 260                    | 3,0...3,2 | 1,3...1,9 | 0,7...1,0 | 0,2      | 0,12 |
| СЧ 35        | 350                      | 275                    | 2,9...3,0 | 1,2...1,5 | 0,7...1,1 | 0,2      | 0,12 |

К серым чугунам относятся также высокопрочные и легированные чугуны.

Особенностью *высокопрочного (модифицированного) чугуна* является шаровидная форма включений графита, равномерно распределенного в его структуре. При получении высокопрочного чугуна перед его разливанием в расплав вводят примеси магния или церия. Наряду с высокой прочностью высокопрочный чугун обладает и определенной пластичностью. Для него установлены марки ВЧ35-ВЧ100. Для каждой марки, кроме прочности (временного сопротивления) при растяжении норми-

руется условный предел текучести. С увеличением марки от ВЧ35 до ВЧ100 он увеличивается от 220 до 700 МПа.

Высокопрочные чугуны во многих изделиях и конструкциях эффективно заменяют сталь. Из них изготавливают зубчатые колеса, коленчатые валы двигателей, прокатные валки и другие детали, работающие под действием переменных напряжений и ударных нагрузок.

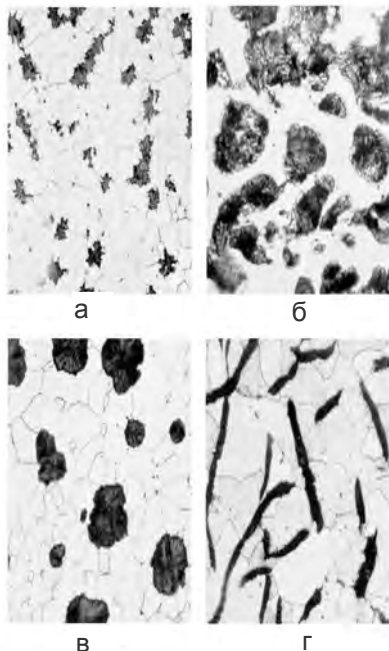


**Рис. 9.18.** Структуры чугунов: а – ковкий чугун с включениями графита; б – белый чугун; в – серый чугун с шаровидным графитом; г – серый чугун с пластинами графита

К высокопрочным чугунам относится также *чугун с вермикулярным графитом*. Особенностью его структуры является то, что каждая частица шаровидного графита растет из отдельного центра кристаллизации. Для него характерны, наряду с высокой прочностью, и более высокие литейные свойства (низкая температура кристаллизации, текучесть в жидком состоянии, малая усадка), что позволяет получать изделия сложной формы, в том числе тонкостенные, выдерживающие значительные силовые и тепловые нагрузки.

Для повышения эксплуатационных характеристик и придания чугуну специальных свойств (жаропрочности, износостойкости, коррозионной стойкости, немагнитности и др.) в его состав вводят легирующие элементы (Cu, Al, Ni, Cr, W, Ti, Mo и др.). *Легируемые чугуны* разделяют на классы: никеле-

вые, хромистые, алюминиевые и т.д. Их применяют для изготовления деталей машин с повышенными механическими свойствами, работающими в агрессивных средах.

Специальные чугуны или *ферросплавы* имеют повышенное содержание кремния или марганца (ферросилиций, ферромарганец). Эти чугуны применяются при плавке стали для ее раскисления, т.е. удаления из стали вредной примеси – кислорода.

Белый чугун, в связи с тем, что углерод в нем находится в виде карбида железа – цементита характеризуется высокой твердостью и хрупкостью, сопротивляемостью износу, плохой обрабатываемостью режущими инструментами. Белый чугун применяют для получения ковкого чугуна и стали. Его называют также пердедельным.

*Ковкий чугун* получают после длительного отжига белого чугуна при высоких температурах, когда цементит почти полностью распадается с выделением свободного углерода в виде графита хлопьевидной формы. В отличие от серых, ковкие чугуны являются более прочными и пластичными, легче обрабатываются. При маркировке ковких чугунов первыми двумя цифрами обозначают предел прочности при растяжении, вторыми – относительное удлинение в % при разрыве образца. Например, КЧ35-10 – ковкий чугун с прочностью при растяжении 350 МПа и относительным удлинением 10%. Из ковких чугунов изготавливают крюки, скобы, ролики конвейеров, фланцы и др.

## 9.6. Сплавы цветных металлов

В различных областях техники широко применяют сплавы из цветных металлов, которые в отличие от железоуглеродистых сплавов имеют более высокую пластичность при обычной температуре, большую стойкость против коррозии, тепло- и электропроводность, более низкую температуру плавления. В строительстве наиболее широко применяют *алюминиевые сплавы*. Диаграмма состояния деформируемых и литейных алюминиевых сплавов приведена на рис. 9.19.

Алюминиевые сплавы характеризуются высокой удельной прочностью, способностью сопротивляться инерционным и динамическим нагрузкам и хорошей технологичностью. Предел прочности ряда сплавов достигает 500-700 МПа, их удельная прочность приближается к таковой для высокопрочных сталей.

Алюминиевые сплавы классифицируют по технологии изготовления изделий на:

деформируемые, изделия из которых получают методами горячей или холодной пластической деформации (рис. 9.19); литейные, изделия из которых получают методами литья; спеченные, изделия из которых получают методами порошковой металлургии.

По способности упрочняться термической обработкой деформируемые сплавы подразделяют на термически упрочняемые и неупрочняемые. Для упрочнения алюминиевых сплавов применяют закалку и старение, а для устранения неравновесных структур и де-

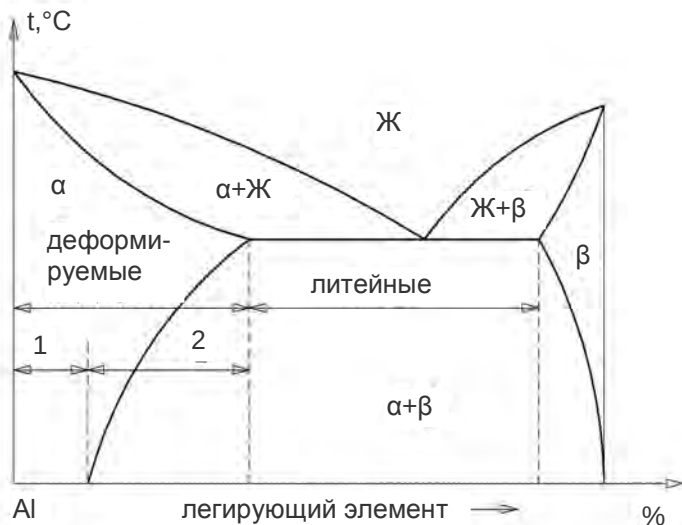


**Рис. 9.19.** Диаграмма состояния алюминиевых сплавов:  
 1 – деформируемые, термически неупрочняемые сплавы;  
 2 – деформируемые, термически упрочняемые сплавы;  
 Ж – расплав;  $\alpha$ ,  $\beta$  – модификации сплавов

формационных дефектов строения, снижающих пластичность, сплавов – отжиг.

Наибольшее практическое применение получили алюминиевые сплавы следующих видов: алюминивно-марганцевые, алюминивно-магниеые (магналии), алюминивно-медно-магниеые (дюралюмины), алюминивно-магниево-кремниеые (авиалии) и алюминивно-цинко-магниеые, а также алюминивно-кремниеые (силумины).



Алюминиево-марганцевые (АМ<sub>ц</sub>) и алюминиево-магниевого (АМ<sub>г</sub>) сплавы относятся к деформируемым неупрочняемым при термической обработке. Они обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошо свариваются различными видами сварки. Профили из них поставляются в отожженном или горячепрессованном состоянии. Алюминиево-магниевого сплавы – магналии являются наиболее легкими и коррозионностойкими алюминиевыми сплавами. Их широко применяют для сварных и клепаных деталей конструкций, работающих в морской воде и в условиях влажной атмосферы, для витражей, перегородок, дверей, оконных рам и др. Сплавы системы Al – Mg легируются малыми добавками бериллия, титана и циркония, что способствует улучшению их механических свойств за счет уменьшения интервала кристаллизации. В промышленных сплавах магний содержится в пределах от 0,5 до 12-13%. Он образует с алюминием твердый раствор, кроме того, начиная с концентрации 1,4% Mg, происходит выделение вторичной фазы MgAl. Также как алюминиево-марганцевые алюминиево-магниевого сплавы используются в отожженном состоянии.

Определенное повышение прочности изделий из сплавов, неупрочняемых термической обработкой, достигается при холодной пластической деформации путем нагартовки (разновидность наклепа).

Возможное содержание марганца и магния в сплавах, не подвергаемых термической обработке, и их механические свойства приведены в табл. 9.10.

Таблица 9.10

Содержание Mn и Mg и механические свойства алюминиевых сплавов, не подвергаемых термической обработке

| Сплав             | Содержание элементов, % |           | Механические свойства        |                       |                            |
|-------------------|-------------------------|-----------|------------------------------|-----------------------|----------------------------|
|                   | Mn                      | Mg        | Временное сопротивление, МПа | Предел текучести, МПа | Относительное удлинение, % |
| АМ <sub>ц</sub>   | 1,0...1,6               | -         | 130                          | 50                    | 23                         |
| АМ <sub>г</sub> 2 | 0,2...0,6               | 1,8...2,8 | 200                          | 100                   | 23                         |
| АМ <sub>г</sub> 3 | 0,3...0,6               | 3,2...3,8 | 220                          | 110                   | 20                         |
| АМ <sub>г</sub> 5 | 0,3...0,6               | 4,8...5,8 | 300                          | 150                   | 20                         |
| АМ <sub>г</sub> 6 | 0,5...0,8               | 5,8...6,8 | 340                          | 170                   | 18                         |

К наиболее широко применяемым деформируемым алюминиевым сплавам, упрочненным термической обработкой, относятся дюралюмины и авиали. Такие сплавы содержат в своем составе по три-четыре, а иногда и больше компонентов.

В наиболее типичных деформируемых алюминиевых сплавах типа *дюралюминия* содержится от 2,2 до 5,2% Cu, 1,75% Mg, 1% Si, 1% Fe и 1% Mn. Марки дюралюминия обозначаются буквой Д с последующей цифрой – условным номером сплава, например Д<sub>1</sub>, Д<sub>16</sub>, Д<sub>18</sub> и др. С повышением номера сплава увеличивается его механическая прочность. С целью дополнительного повышения коррозионной стойкости листы дюралюминия плакируют, т.е. наносят на их поверхность тонкий слой чистого алюминия.

Сплавы алюминия с магнием и кремнием – *авиали* (АВ, АДЗ1 и др.) имеют высокую пластичность, свариваемость и коррозионную стойкость, хотя уступают по прочности дюралюминам.

*Ковочные сплавы* (АК) характеризуются хорошей пластичностью и удовлетворительной прочностью. По химическому составу они близки к дюралюминам, хотя содержание кремния в них выше.

*Высокопрочные сплавы* менее пластичны, чем дюралюминий. Их марки обозначают буквой "В" с условным номером (например, В95). В наибольшей мере влияют на прочность алюминия легирующие примеси цинка и магния. Незначительное легирование марганцем и хромом существенно повышает коррозионную стойкость.

*Жаропрочные сплавы* (АКЧ-1, АК-4 и др.) сохраняют свои механические свойства до температуры 300°C. Их дополнительно легируют такими элементами как железо, никель и титан.

Химический состав и механические свойства некоторых деформируемых алюминиевых сплавов приведены в табл. 9.11 и 9.12.

Кроме алюминиевых сплавов в строительстве применяют *медные сплавы* – латунь и бронзу. В *латуни* основным легирующим элементом является цинк (до 45%), а в *бронзе* – олово, алюминий, кремний и другие элементы. При маркировке бронзы и латуни указывается их состав. Например, алюминиевая бронза, содержащая 8-10% Al и 2-4% Fe, маркируется так: БрАЖ9-4.

В простой латуни указывается содержание меди (Л80, Л70 и др.), в легированной – и легирующих элементов.

Из литейных алюминиевых сплавов распространены *силумины* – сплавы алюминия с кремнием, добавляемым в количестве от 4 до 13%. Наиболее распространены марки силуминов – АК12, АК9, АК7. Число после буквы К указывает среднюю массовую часть кремния в %.

Таблица 9.11  
Химический состав некоторых деформируемых  
алюминиевых сплавов

| Сплав                           | Содержание элементов, % |            |             |           |                                              |
|---------------------------------|-------------------------|------------|-------------|-----------|----------------------------------------------|
|                                 | Си                      | Mg         | Mn          | Si        | Другие<br>элементы                           |
| Дюралюмины                      |                         |            |             |           |                                              |
| Д1                              | 3,8...4,8               | 0,4...0,8  | 0,4...0,8   | -         | -                                            |
| Д6                              | 3,8...4,9               | 1,2...1,8  | 0,3...0,9   | -         | -                                            |
| Сплав авиаль                    |                         |            |             |           |                                              |
| АВ                              | 0,1...0,5               | 0,45...0,9 | 0,15...0,35 | 0,5...1,2 | -                                            |
| Высокопрочный алюминиевый сплав |                         |            |             |           |                                              |
| В95                             | 1,4...2,0               | 1,8...2,8  | 0,2...0,6   | -         | 5...7 Zn<br>0.1...0.25<br>Cr                 |
| Ковочные алюминиевые сплавы     |                         |            |             |           |                                              |
| АК6                             | 1,5...2,6               | 0,4...0,8  | 0,4...0,8   | 0,7...1,2 | -                                            |
| АК8                             | 3,9...4,8               | 0,4...0,8  | 0,4...1,0   | 0,6...1,2 | -                                            |
| Жаропрочные алюминиевые сплавы  |                         |            |             |           |                                              |
| АК4-1                           | 1,9...2,5               | 1,4...1,8  | -           | 0,35      | 0,8...1,4 Fe<br>0.8...1.4 Ni<br>0.02...0.1Ti |
| Д20                             | 6...7                   | -          | 0,4...0,8   | -         | 0,1...0,2Ti                                  |

К наиболее легким конструкционным материалам относятся *магниеые сплавы* (плотность магния 1,7 г/см<sup>3</sup>). Так же как и алюминиевые сплавы, их подразделяют на деформируемые (МА) и литейные (МЛ). Низкая плотность в сочетании с высокой прочностью

## 9. Металлические материалы

и коррозионной стойкостью характерна также для *титановых сплавов*.

Таблица 9.12

Механические свойства некоторых деформируемых алюминиевых сплавов после закалки и старения

| Марки сплава                    | Предел текучести, МПа<br>$\sigma_{0,2}$ | Временное сопротивление, МПа<br>$\sigma_B$ | Относительное удлинение, %<br>$\delta$ |
|---------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|
| Дюралюмины                      |                                         |                                            |                                        |
| Д1                              | 320                                     | 490                                        | 14                                     |
| Д16                             | 400                                     | 540                                        | 11                                     |
| Сплав авиаль                    |                                         |                                            |                                        |
| АВ                              | 200                                     | 260                                        | 8                                      |
| Высокопрочный алюминиевый сплав |                                         |                                            |                                        |
| В95                             | 530...550                               | 560...600                                  | 8                                      |
| Ковочные алюминиевые сплавы     |                                         |                                            |                                        |
| АК6                             | 300                                     | 420                                        | 12                                     |
| АК8                             | 380                                     | 480                                        | 10                                     |
| Жаропрочные алюминиевые сплавы  |                                         |                                            |                                        |
| АК4-1                           | 280                                     | 430                                        | 13                                     |
| Д20                             | 250                                     | 400                                        | 12                                     |

## 9.7. Коррозия металлов

*Коррозия* (лат.corrosio – разъедание) – это постепенное разрушение металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с внешней средой.

*Химическая коррозия металлов* возможна в сухих газах и неэлектролитах. В первом случае разрушение металлов идет при взаимодействии с газами и парами при температуре более 100°C (окисление металла при нагреве, коррозия печной аппаратуры, лопаток паровых и газовых турбин), во втором случае коррозия идет в нефти, бензине, смазочных маслах и т.п.

Наибольшее разрушение металлов происходит в результате *электрохимической коррозии*, т.е. при воздействии электроли-

тов – водных растворов солей, кислот и щелочей. Этот вид коррозии наблюдается в атмосферных условиях, при действии морской, речной, грунтовой и других вод.

На поверхности металла при контакте с электролитом образуется множество микрогальванических элементов, при работе которых растворяется материал анода и избыточные электроны перемещаются к катоду (рис. 9.20). Образование микрогальванических элементов объясняется неоднородностью металлов, наличием в них структурных участков с различными электродными потенциалами, а также неоднородностью среды. В железоуглеродистых сплавах, например, анодом обычно является феррит, а катодом – цементит или неметаллические включения.

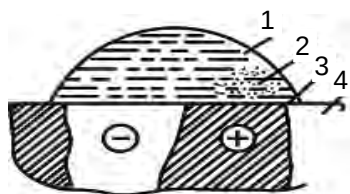


**Рис. 9.20.** Схема электрохимической коррозии стали:  
1 – вода; 2 – продукты коррозии; 3 – цементит;  
4 – феррит

Особенно интенсивно протекает процесс электрохимической коррозии при периодическом погружении металла в электролит, например при попеременном увлажнении и высушивании металлических конструкций гидротехнических сооружений.

Коррозия металлов ускоряется под влиянием электрического тока. Электрокоррозия металлов происходит при подключении конструкции к положительному источнику тока, например при прохождении трубопровода вблизи токонесущих трамвайных рельсов.

Активному протеканию процесса коррозии способствуют углекислый и сернистый газы, хлористый водород и хлористые соли.

Эффективнее всего повышают коррозионную стойкость сталей добавки никеля, хрома, фосфора и особенно меди; негативно влияет марганец. Распространенным методом повышения коррозионной стойкости строительных сталей является легирование их 0,2-0,4% Си, при этом стойкость против коррозии возрастает на 20-30%.

Металлы защищают от коррозии, применяя также лакокрасочные, неорганические неметаллические и металлические по-

крытия. Эффективные лакокрасочные покрытия разработаны на основе синтетических полимеров. К *неметаллическим покрытиям* принадлежат самые разнообразные защитные пленки: оксидные, фосфатные, цементные, асбестоцементные, эмалевые и другие.

*Металлические покрытия* получают нанесением на поверхность изделий тонкой пленки из другого металла. Их различают по механизму защитного действия (анодные и катодные), а также по способу нанесения (гальванические, металлические, нанесенные из расплава или вакуумным насыщением и т.п.). Анодное покрытие характерно тем, что его электродный потенциал более отрицателен, чем в металле, который оно защищает. В случае повреждения покрытие разрушается с большей скоростью, чем защищаемый металл, выполняя протекторную роль. Для анодных покрытий стали предназначены преимущественно цинк и алюминий, для катодных – медь, олово, никель и др. Если нарушается катодное покрытие, то его защитное действие исчезает.

Срок службы покрытий составляет 25-50 лет. Они дают возможность обеспечить замену высоколегированных сталей низколегированными, защиту стали в атмосферных условиях и при высокой температуре, в морской воде и т.п. Среди цветных металлов для покрытий самым перспективным является алюминий. Наносят защитные пленки из алюминия и его сплавов с помощью электродуговых аппаратов, испарением в вакууме, электролитическим осаждением, плазменным и лазерным напылением.

Активным методом защиты от коррозии является *электрохимический метод*. Он основывается на изменении электрохимического потенциала конструкции благодаря поляризации их постоянным током от внешнего источника или от протектора (рис. 9.21).

При *протекторной защите* к металлу, защищаемому от коррозии, подсоединяют протекторы-аноды, дающие возможность защитить конструкцию от коррозии. Стальные конструкции опор ЛЭП, электроконтактной сети, трубопроводов оборудуют протекторами в виде пластин из цинка, алюминиево-цинковых или магниевых сплавов.

Для защиты от коррозии морских гидротехнических сооружений, магистральных трубопроводов и других ответственных конструкций используют также катодную защиту. В этом случае защищаемую конструкцию подсоединяют к отрицательному полюсу постоянного источника тока, и сталь выполняет роль катода.

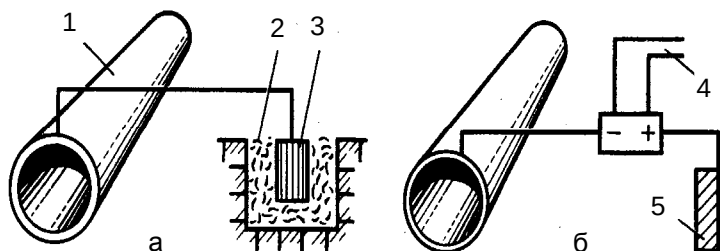


**Рис. 9.21.** Защита трубопровода от коррозии:

а – протекторная; б – катодная;

1 – труба; 2 – засыпка; 3 – протектор; 4 – источник тока;  
5 – металл

Скорость коррозии металлов уменьшают с помощью добавок *ингибиторов и пассиваторов*. Успешно тормозят коррозионный процесс в нейтральных и щелочных средах сильные окислители - соли щелочных и щелочноземельных металлов (хроматы, нитраты и др.). Использование добавок (в частности нитрит-нитрат кальция) эффективно при защите от коррозии стальной арматуры в железобетоне.

## 10. МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

Совокупность вяжущих веществ, т.е. веществ, обладающих способностью связывать разнородные компоненты, отвердевать и создавать монолитные материалы можно разделить на два больших класса – *неорганические* и *органические* в зависимости от состава образующих их химических соединений.

В зависимости от условий твердения вяжущие материалы подразделяют на воздушные, гидравлические и автоклавного твердения.

*Воздушные вяжущие* могут твердеть, набирать прочность и длительно сохранять ее лишь на воздухе. В эту группу входят гипсовые и магнезиальные вяжущие, воздушная строительная известь, жидкое стекло.

*Гидравлические вяжущие* способны твердеть, набирать прочность и длительно сохранять ее как в воздушной, так и в водной среде. Эта группа вяжущих является более универсальной. В нее входят портландцемент и глиноземистый цемент, их разновидности, гидравлическая известь и романцемент, смешанные вяжущие на основе извести, гипса, портландцемента, шлаков, зол и других минеральных материалов.

*Вяжущие автоклавного твердения* интенсивно твердеют при давлении насыщенного пара 0,8-1,5 МПа, что достигается в автоклавах. К ним относятся смеси извести или портландцемента и малоактивных при обычных условиях твердения минеральных материалов, например, кварцевого песка, шлаков, зол и др.

### 10.1. Гипсовые вяжущие материалы

Гипсовые вяжущие материалы – материалы, которые состоят из полуводного гипса  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  или ангидрита  $\text{CaSO}_4$ . Они образуются вследствие тепловой обработки различных гипсосодержащих сырьевых материалов и их предварительного или последующего помола. Гипсовые вяжущие подразделяют в зависимости от температуры обжига на 2 группы: *низкообжиговые* и *высокообжиго-*



вые. Низкообжиговые вяжущие получают при температуре 120-180°C, а высокообжиговые – при температуре 650-1000°C.

**Низкообжиговые гипсовые вяжущие.** К низкообжиговым гипсовым вяжущим относят: строительный гипс, высокопрочный или технический гипс, формовочный и медицинский гипсы.

Низкообжиговые вяжущие в строительной практике наиболее распространены. Эти вяжущие материалы имеют низкую энергоёмкость (в 5 раз более низкую, чем у портландцемента), являются быстросхватывающимися и быстротвердеющими материалами. Они

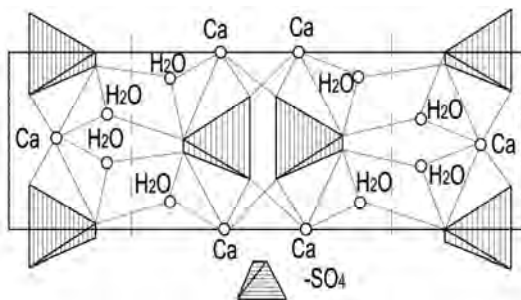


**Рис. 10.1.** Структура двуводного гипса

стистические свойства.

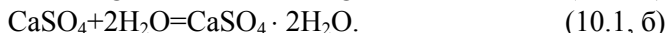
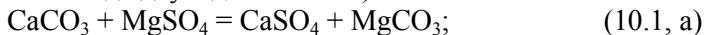
Как сырье для изготовления гипсовых вяжущих применяют естественные и искусственные материалы, в которых присутствуют минералы гипс или ангидрит. Для получения низкообжиговых гипсовых вяжущих обычно применяют *гипсовый камень* – плотную кристаллическую разновидность горных пород, которая состоит преимущественно из двуводного сульфата кальция (двуводрата). К разновидностям гипсового камня относятся: прозрачный (гипсовый) шпат, мраморовидный (алебастр) и волокнистый гипс (селенит). В кристаллической решетке двуводного гипса (рис. 10.1) вода размещена между отдельными слоями сульфата кальция, поэтому она относительно легко удаляется при нагревании. Кристаллы гипса имеют призматическую форму. В зависимости от содержания двуводрата гипсовый камень бывает четырех сортов: в первом сорте его содержание – не менее 95%; во втором – 90%; в третьем – 80%; в четвертом – 70%. Чем больше количество двуводрата в гипсовом камне, тем его качество выше: первый и второй сорт применяют для высоких марок строительного гипса, высокопрочного, формовочно-

позволяют применять конвейерный способ изготовления разных изделий. Изделия на основе гипсовых вяжущих материалов имеют белый цвет, низкую теплопроводность, им присущи легкость, огнестойкость, хорошие аку-

## 10. Минеральные вяжущие вещества

го, медицинского гипса. Для рядовых марок строительного гипса применяют обычно третий и четвертый сорта гипсового камня.

Гипсовый камень – осадочная горная порода. Она образовалась вследствие взаимодействия известняков с сульфатными растворами (реакция протекает в водной среде, поэтому  $\text{CaSO}_4$  гидратируется и кристаллизуется в виде двухводного гипса):



Гипсовый камень является сравнительно мягкой породой, твердость его по шкале Мооса – 2, истинная плотность 2,2-2,4 г/см<sup>3</sup>. Измельченный гипс имеет насыпную плотность – 1,3-1,4 г/см<sup>3</sup>. Естественная влажность гипсового камня обычно не превышает 8-10%. Цвет гипсового камня – белый или серый, окраска обусловлена содержанием различных примесей.

*Ангидрит* (безводный сульфат кальция) встречается в природе редко. Он образует подстилающие слои на гипсовых месторождениях, в верхних слоях обводняется и переходит в двухводный гипс. Ангидрит более твердая порода (твердость от 4 до 5, истинная плотность 2,8-2,9 г/см<sup>3</sup>). Так же как и двухводный гипс он образует призматические кристаллы, но они более плотные, так как их не разделяет кристаллизационная вода. Вяжущие материалы на основе природного ангидрита можно получать без термообработки только помолом с введением добавок активаторов.

Кроме естественного сырья, для гипсовых вяжущих могут использоваться разные гипсосодержащие отходы промышленности. Они образуются в большом количестве, в основном, на предприятиях минеральных удобрений. Из них наиболее распространены фосфогипс, борогипс, кремний – и фторогипс.

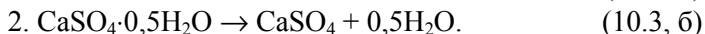
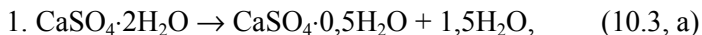
*Фосфогипс* – отход, получаемый при сернокислой обработке апатита или фосфорита:



Фосфорная кислота отфильтровывается от сульфата кальция, который может присоединять воду и кристаллизоваться в виде двухводного или полуводного гипса. Фосфогипс образуется в виде шлама с влажностью до 70%, при получении вяжущих его желательно очищать от фосфорнокислых и других примесей и сушить.

Дегидратация гипса может проходить в воздушной или в жидкой среде. Если аппараты для обжига связаны с атмосферой, при дегид-

ратации выделяется водяной пар, в герметических аппаратах (автоклавах) вода выделяется в жидком состоянии. Процесс дегидратации двухводного гипса идет в 2 стадии:



В зависимости от условий тепловой обработки, по данным Д.С. Белянкина и Л.Г. Берга, существует ряд модификаций сульфата кальция (рис. 10.2).

В атмосфере насыщенного пара или в жидкой среде (если кристаллизационная вода выделяется в жидком состоянии) образуется  $\alpha$ -полугидрат ( $\alpha$ - $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ). Кристаллы  *$\alpha$ -полугидрата* более четкие и крупные, они сохраняют строение исходной породы. В атмосфере, ненасыщенного пара, вода из гипса выделяется в парообразном состоянии и образуется  *$\beta$ -полугидрат* ( $\beta$ - $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), кристаллы которого более дисперсные, имеют высокую удельную поверхность, большое количество дефектов. В существующих промышленных аппаратах  $\beta$ -полугидрат получают при 110-170°C,  $\alpha$ -полугидрат – при 120-140°C.

При затворении водой  $\beta$ -полугидрат требует большее количество воды, чем  $\alpha$ -полугидрат, чем и объясняется более низкая прочность искусственного камня на его основе. Для образования гипсового теста нормальной густоты на базе  $\alpha$ -полугидрата необходимо 40-50% воды, а на базе  $\beta$ -полугидрата – 60-70%. Гипсовое вяжущее из  $\alpha$ -полугидрата используют в виде высокопрочного или технического гипса;  $\beta$ -полугидрата – обычного или строительного гипса.

*Строительный гипс* – гипсовое низкообжиговое вяжущее вещество, которое состоит, в основном, из  $\beta$ -полугидрата сульфата кальция. Технология строительного гипса включает 3 основные операции:

- 1) измельчение гипсового сырья, содержащего двухводный гипс;
- 2) обжиг гипсового сырья;
- 3) тонкий помол готового вяжущего.

Эти операции могут быть осуществлены в разной последовательности:

- 1) операция помола предшествует обжигу;
- 2) операция помола следует за операцией обжига гипсового сырья;
- 3) операции помола и обжига происходят совместно.

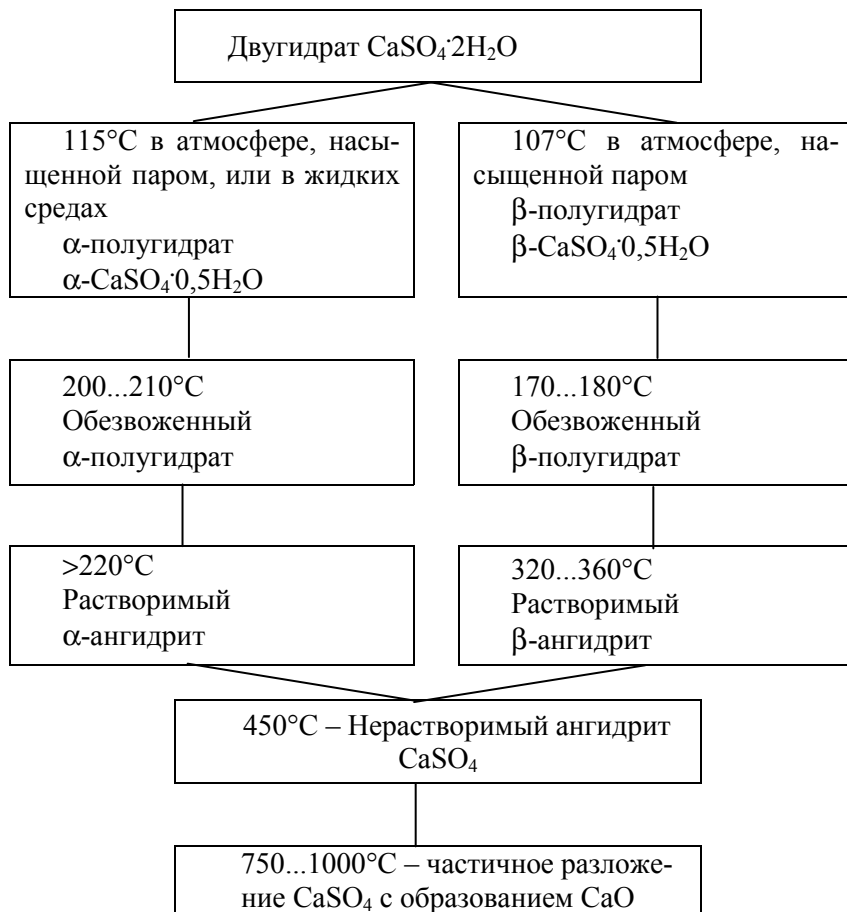


**Рис. 10.2.** Схема превращений  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  при нагревании

Наиболее распространены первые две схемы.

Первая технологическая схема реализуется обычно с применением гипсоварочных котлов, вторая – сушильных барабанов. Получение строительного гипса по третьей схеме возможно в мельницах различного типа, оборудованных топками и системой циркуляции горячих газов.

Для изготовления *высокопрочного гипса* используется в большинстве случаев гипсовый камень первого сорта (95% двугидрата). Получают высокопрочный гипс разными способами, суть которых состоит в том, что сырье в виде мелкого щебня или порошка подвергают термической обработке, вследствие которой выделяется кристаллизационная вода в капельно-жидком состоянии и материал превращается в  $\alpha$ -полугидрат. Тепловая обработка сырья осуществляется обычно в автоклавах при давлении насыщенного пара 0,15-0,3 МПа. Предложено также высокопрочный гипс изготавливать в растворах некоторых солей при температуре больше 100°C и атмосферном давлении, а также в аппаратах-самозапарниках, где пар образуется при испарении воды из гипса во время его нагревания.

Низкообжиговые гипсовые вяжущие – быстротвердеющие материалы, они набирают значительную прочность уже через 1,5...2 часа. С химической точки зрения процесс твердения полугидрата состоит в реакции гидратации и образования дигидрата:



Эта реакция экзотермическая, как и другие реакции гидратации, на 1 моль полугидрата выделяется 19,3 кДж тепла, на 1 кг – 133 кДж. Тепловой эффект реакции используется для самовысушивания затвердевшего гипса, хотя в большинстве случаев выделяемого тепла не хватает, чтобы отказаться от специальной операции сушки изделий. Химическая реакция гидратации не объясняет полностью механизм твердения гипса. Наряду с химическими твердение гипсовых вяжущих сопровождается сложными физико-химическими процессами.

Первая теория твердения гипсовых вяжущих была предложена французским химиком Ле Шателье в 1887 г. Она и до сих пор используется при объяснении механизма твердения гипса и других вяжущих. Ле Шателье впервые установил, что растворимость двугидрата значительно ниже чем полугидрата, для двугидрата она составляет приблизительно 2 г/л; полугидрата – 8 г/л, то есть в 4 раза меньше. При замешивании водой по Ле Шателье происходит сначала растворение полугидрата, затем идет реакция гидратации с образованием двугидрата. Так как растворимость двугидрата значительно ниже чем полугидрата, то образуется пересыщенный раствор, который является нестабильным, из него выпадают кристаллы дву-

водного гипса. Это способствует тому, что раствор становится насыщенным относительно полугидрата и вследствие этого его новые порции растворяются в воде. Процесс растворения идет до тех пор, пока полугидрат полностью не прореагирует с водой. Образующиеся кристаллы двугидрата растут, переплетаются, срастаются между собой, что по Ле Шателье и объясняет набор прочности гипсом. Эту теорию называют *кристаллизационной*, потому что в соответствии с ней основными при твердении являются процессы растворения полуводного и кристаллизации двуводного гипса.

Согласно теории Ле Шателье набор прочности завершается после полного прохождения процессов гидратации и кристаллизации двуводного гипса, но на практике набор прочности гипсом длится значительно дольше. Кристаллизация завершается через 20-30 мин., а набор прочности – на протяжении нескольких часов.

Классическая теория твердения предложена также немецким ученым В. Михаэлисом который предложил коллоидный механизм твердения вяжущих веществ (*коллоидная теория*). По Михаэлису вода непосредственно взаимодействует с поверхностью полугидрата без растворения. При этом образуются гелеобразные оболочки на исходных частицах. Образовавшийся коллоидный раствор (гель) высыхает и приобретает некоторую прочность. Теория В. Михаэлиса имеет значительно меньшее количество приверженцев, чем теория Ле Шателье.

А.А. Байков создал объединенную *коллоидно-химическую* теорию твердения вяжущих материалов. По теории Байкова процесс твердения гипса состоит из 3-х этапов:

1) растворение полугидрата в воде (этот период довольно короткий и продолжается до начала схватывания);

2) коллоидация (образование коллоидного раствора) – *топохимический процесс*, когда вода взаимодействует с исходным материалом без растворения, на протяжении этого этапа проходит реакция гидратации;

3) кристаллизация (перекристаллизация) – укрупнение мелких кристалликов двугидрата, что сопровождается ростом прочности твердеющего материала.

Глубокие исследования процессов твердения гипса выполнены П.А. Ребиндером, Е.Е. Сегаловой, А.Ф. Полаком, В.Б. Ратиновым и др.

В соответствии с современными экспериментальными данными развитие структуры твердения гипса протекает в два этапа. В течение первого формируется каркас кристаллизационной структуры с возникновением контактов срастания между кристалликами новообразований. В течение второго этапа происходит обрастание каркаса и рост составляющих его кристаллов. Это приводит к повышению прочности, но при определенных условиях может являться и причиной появления внутренних напряжений. Наибольшая конечная прочность обуславливается возникновением кристаллов новообразований достаточной величины при минимальных напряжениях, сопровождающих формирование и развитие кристаллизационной структуры.

Для строительного гипса истинная плотность  $\rho = 2,65-2,70$  г/см<sup>3</sup>, для высокопрочного –  $\rho = 2,7-2,75$  г/см<sup>3</sup>. Это объясняется тем, что кристаллическая решетка  $\alpha$ -полугидрата более плотная чем  $\beta$ -полугидрата. Значения истинной плотности вяжущих используют в расчетах их абсолютного объема, составов композиционных материалов на их основе. Насыпная плотность ( $\rho_0$ ) для гипсовых вяжущих в рыхлом состоянии 800-1100 кг/м<sup>3</sup>, в уплотненном состоянии 1200-1400 кг/м<sup>3</sup>. Величина насыпной плотности учитывается в расчетах емкостей для хранения вяжущих, при их транспортировании и т.д.

В зависимости от тонкости помола гипсовые вяжущие делят (ГОСТ125-79) на 3 группы по остатку на сите №02:

- *гипс грубого помола* (I группа) – не более 23%;
- *гипс среднего помола* (II группа) – не более 14%;
- *гипс тонкого помола* (III группа) – не более 2%.

Водопотребность вяжущих определяется количеством воды, которое необходимо для образования теста нормальной густоты. Для гипсовых вяжущих водопотребность определяется на приборе Суттарда по распылу теста в мм (при нормальной густоте распыл составляет  $180 \pm 5$  мм). Для строительного гипса водопотребность составляет 60...70%, для высокопрочного гипса – 40-50% массы исходного порошка.

Для реакции гидратации гипсовых вяжущих теоретически необходимо 18,6% воды. Избыточная вода испаряется и образует поры. Чем больше избыточной воды, тем больше пористость и в конечном счете ниже прочность искусственного камня. Затвердевший гипсо-

## 10. Минеральные вяжущие вещества

вый камень имеет пористость 30-50%. На практике снижение пористости искусственного гипсового камня за счет уменьшения водопотребности вяжущего осуществляется разными способами: изготовлением полугидрата  $\alpha$ -модификации; замедлением сроков схватывания (с помощью специальных добавок); обработкой гипса паром (искусственное старение, при котором поверхностный слой переходит из полуводного в двуводный гипс); введением добавок пластификаторов и в особенности суперпластификаторов.

При одинаковой водопотребности прочность  $\alpha$ - и  $\beta$ -полугидратов может быть практически одинакова.

В зависимости от сроков схватывания гипсовые вяжущие делятся на:

- *быстротвердеющие* (А) – начало схватывания не раньше 2 мин., конец – не позднее 15 мин;
- *нормальнотвердеющие* (Б) – начало схватывания не раньше 6 мин., конец - не позднее 30 мин;
- *медленнотвердеющие* (В) – начало схватывания не раньше, чем 20 мин., конец – не ограничивается.

Для регулирования сроков схватывания гипса применяются разные добавки. Наиболее распространена классификация добавок, регулирующих сроки схватывания, предложенная В.Б. Ратиновым и Т.И. Розенберг. Согласно этой классификации добавки в зависимости от механизма их действия разделяют на 4 группы:

1. Вещества, влияющие на растворимость полугидрата и двугидрата и не вступающие с ними в химическое взаимодействие. Если добавки повышают растворимость полугидрата, то они ускоряют схватывание. Обратный эффект достигается, если добавки повышают растворимость двугидрата или уменьшают растворимость полугидрата. К ускорителям относятся обычно сильные электролиты: NaCl, CaCl, CaBr, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, замедлителям – слабые электролиты и неэлектролиты (аммиак, этанол). Для добавок первой группы характерен “порог эффективности” – предельная их концентрация, при которой достигается максимальный эффект.

2. Вещества, взаимодействующие с полугидратом (например, соли борной и фосфорной кислот) и образующие труднорастворимые пленки. Они замедляют схватывание и пассивируют твердение гипса.



3. Вещества, являющиеся центрами кристаллизации (например, двуводный гипс,  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и др.). Они ускоряют твердение и также как добавки первой группы имеют “порог эффективности”.

4. Органические поверхностно-активные вещества, которые адсорбируются на поверхности вяжущих и уменьшают скорость реакции гидратации и образования зародышей кристаллов (например, лигносульфонаты щелочных и щелочно-земельных металлов, кераиновый замедлитель и др.).

Концентрация добавок – регуляторов схватывания – составляет обычно 0,1-0,5% массы вяжущего.

Прочность гипсовых вяжущих определяется через 2 часа после затворения гипса водой на образцах из теста нормальной густоты. Изготавливают образцы – призмы (балочки) размерами 40х40х160мм. В зависимости от показателей прочности на сжатие и изгиб в МПа устанавливают марки гипсовых вяжущих (табл. 10.1). Строительный гипс изготавливают обычно марок – Г2-Г10; высокопрочный – более высоких марок.

Таблица 10.1

Прочность гипсовых вяжущих

| Марка вяжущего | Предел прочности балочек через 2 часа твердения, не менее, МПа |          | Марка вяжущего | Предел прочности балочек через 2 часа твердения, не менее, МПа |          |
|----------------|----------------------------------------------------------------|----------|----------------|----------------------------------------------------------------|----------|
|                | на сжатие                                                      | на изгиб |                | на сжатие                                                      | на изгиб |
| Г-2            | 2                                                              | 1,2      | Г-10           | 10                                                             | 4,5      |
| Г-3            | 3                                                              | 1,8      | Г-13           | 13                                                             | 5,5      |
| Г-4            | 4                                                              | 2        | Г-16           | 16                                                             | 6        |
| Г-5            | 5                                                              | 2,5      | Г-19           | 19                                                             | 6,5      |
| Г-6            | 6                                                              | 3        | Г-22           | 22                                                             | 7        |
| Г-7            | 7                                                              | 3,5      | Г-25           | 25                                                             | 8        |

Прочность гипсовых вяжущих зависит от многих факторов, из которых основными являются модификация полугидрата и водо-гипсовое отношение (В/Г) (рис. 10.3). Сравнительно высокую прочность имеют гипсовые изделия из жестких смесей, изготавливаемые прессованием, однако при снижении В/Г усложняется технология.

Поэтому на практике широко применяют способ литья гипсовых изделий, требующий минимальных трудо- и энергозатрат.

Прочность гипсовых материалов зависит от их влажности. Увлажнение затвердевшего гипса даже на 1% существенно снижает прочность. Прочность гипса увеличивается в 1,5-2 раза при испарении избыточной воды.

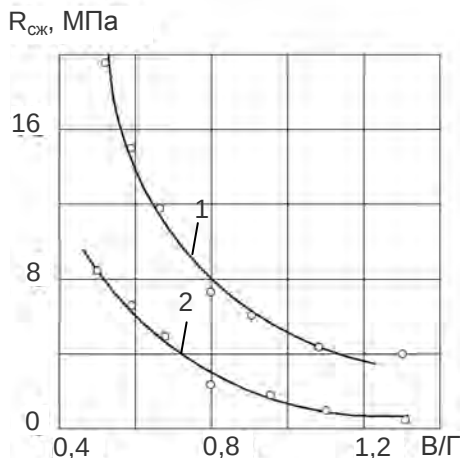


**Рис. 10.3.** Влияние водогипсового отношения (В/Г) на предел прочности при сжатии гипсовой отливки:

- 1 – прочность сухих образцов;
- 2 – прочность влажных образцов

Гипс в особенности на основе  $\alpha$ -полугидрата в начальный период твердения несколько увеличивается в объеме (до 0,15%). В последующем расширение сменяется усадкой. Для гипсовых изделий характерна значительная ползучесть, ограничивающая их применение для несущих конструкций. Ползучесть возрастает при увеличении влажности изделий.

Гипсовые изделия имеют повышенную огнестойкость, обусловленную их сравнительно низкой теплопроводностью. При пожаре они выдерживают 5-6

часов без разрушения. Гипсовые изделия нельзя армировать стальной арматурой, так как гипс при твердении имеет нейтральную среду и не защищает арматуру от коррозии. Поэтому изделия из гипса армируют деревянной арматурой, стекловолокном и т.п.

Водостойкость гипсовых материалов низкая. Они нормально твердеют и наращивают прочность в воздушно-сухих условиях. Для строительного гипса коэффициент размягчения  $K_p = 0,35-0,40$ ; для высокопрочного –  $0,40-0,45$ . Более высокое значение  $K_p$  для затвердевшего высокопрочного гипса объясняется большей его плотностью. Возможно применение ряда способов повышения водостойкости гипса: снижение его растворимости; повышение плотности гипсовых изделий; пропитка гипсовых изделий гидрофобными ве-

ществами. Снижение растворимости гипса обеспечивается введением добавки извести (до 20% от массы гипса). Еще больший эффект дает введение наряду с известью пуццолановых добавок (золы, опок, вулканического пепла и т.д.). Водостойкость гипса существенно повышает добавка доменного шлака, применяются также композиции, которые состоят из гипса, извести и шлака ( $K_p=0,6-0,7$ ).

Широкое распространение в строительстве нашли *гипсоцементно-пуццолановые вяжущие* (ГЦПВ), разработанные А.В. Волькенским. В состав ГЦПВ входят гипс – 50-70%, портландцемент – 15-25%, пуццолановая добавка – 10-15%. Последняя взаимодействует с гидроксидом кальция, образуемым при гидролизе алита – основного минерала цементного клинкера. При этом снижается концентрация  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Это приводит к образованию менее основных гидроалюминатов, что в свою очередь предотвращает образование высокоосновного гидросульфалюмината – *эттрингита* ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ), вызывающего опасное расширение затвердевшей гипсоцементной композиции. Гипсоцементнопуццолановые вяжущие позволяют получать бетоны, которые имеют 30-40% марочной прочности уже через 2 часа после затворения, их  $K_p=0,6-0,7$ . Они используются для изготовления объемных элементов, панелей полов и других изделий, для которых требуется наряду с повышенной прочностью и значительная водостойкость.

Наряду с гипсоцементнопуццолановыми изготавливают *гипсоцементношлаковые вяжущие* (ГЦШВ), которые содержат до 30-40% кислого доменного шлака.

Значительный эффект может быть достигнут при пропитке гипсовых изделий гидрофобными веществами и различными полимерами. Для пропитки наиболее эффективны гидрофобные кремнийорганические жидкости (алкилсиликонаты натрия). Композиции гипсовых вяжущих с добавками акриловых, карбамидных и других полимеров позволяют получить гипсополимерные материалы, имеющие повышенную водостойкость и ряд других улучшенных свойств.

Гипсовые вяжущие широко применяют при изготовлении растворов и бетонных смесей для штукатурных и отделочных работ, различных строительных изделий. Заполнителями могут быть, наряду с плотными, пористые материалы – древесные опилки, перлит, вермикулит и пр. Это позволяет получать растворы и бетоны с низ-

кой теплопроводностью. В гипсовые смеси вводят специальные добавки для регулирования сроков схватывания, пластичности, водоотделения. Широко применяются также сухие смеси на основе гипсовых вяжущих с добавками модификаторов для проведения отделочных работ, устройства полов. Гипсовые смеси используют также для ремонтных работ, реставрации, для изготовления различных строительных деталей (стенные камни, блоки, стеновые и перегородочные панели и др.), для звукопоглощающих плит. В строительстве распространено использование гипсокартонных листов для устройства перегородок, облицовки стен. Эти изделия могут отделываться декоративными и защитными пленками.

**Высокообжиговые гипсовые вяжущие.** В группу высокообжиговых гипсовых вяжущих входят ангидритовые вяжущие и эстрих-гипс.

*Ангидритовые вяжущие* получают обычно обжигом при 600-700° С гипсового камня с последующим измельчением. Они состоят преимущественно из нерастворимого ангидрита. Возможно применение также тонкоизмельченного природного ангидрита. Твердение ангидритовых вяжущих идет лишь при активизации их с помощью некоторых сульфатных солей, извести, обожженного доломита, гранулированных доменных шлаков и др. Добавки вводят при помоле вяжущих или с водой затворения в количестве 0,5-5% (доменный гранулированный шлак 10-15%). При активизации с помощью добавок ангидрит гидратируется и переходит в двуводный гипс.

Ангидритовые вяжущие по сравнению с низкообжиговыми гипсовыми вяжущими характеризуются меньшей водопотребностью, удлинёнными сроками схватывания, меньшей интенсивностью твердения, но более высокой прочностью, высоким сопротивлением истирающим воздействиям, повышенной водостойкостью. Их нормальная густота 30-35%, начало схватывания не ранее 30 мин, конец – до 8 ч, предел прочности на сжатие в цементно-песчаных растворах через 7 сут – 5-25 МПа.

*Эстрих-гипс* (высокообжиговое ангидритовое вяжущее) получают обжигом гипсового камня при 800-950°С. Он также состоит в основном из нерастворимого ангидрита, но включает 2-4% оксида кальция, образовавшееся при разложении  $\text{CaSO}_4$  (иногда карбоната

кальция). В эстрих-гипс не требуется введение специальных активизаторов.

Ангидритовые вяжущие применяют для устройства бесшовных полов и подготовки под линолеум. Их используют также для получения отделочных растворов, архитектурно-строительных изделий.

## 10.2. Строительная известь и известесодержащие вяжущие

К извести относят материалы, состоящие преимущественно из оксида или гидроксида кальция.

**Воздушная и гидравлическая известь.** В зависимости от условий твердения различают воздушную и гидравлическую известь. Воздушную известь получают обжигом известняковых пород, содержащих до 6-8% глинистых примесей, гидравлическую – при большем содержании глинистых примесей.

Полуфабрикатом для известковых вяжущих служит негашеная *комовая известь* – продукт обжига известняков до максимально возможного удаления углекислого газа. Комовую известь получают в виде смеси кусков различной величины. Продуктом помола комовой извести является *молотая негашеная известь*. При гашении комовой или молотой извести и переводе оксидов кальция и магния в их гидроксиды получают в зависимости от количества взятой воды – сухой порошок – *гидратную известь* (известь-пушонку) или пластичное *известковое тесто*.

В качестве исходных материалов для получения известковых вяжущих служат карбонатные породы-известняки, мел, доломитизированные известняки и доломиты. Основными минералами, образующими эти породы, являются кальцит, арагонит и доломит. Кальцит и арагонит – разновидности  $\text{CaCO}_3$ , отличающиеся особенностями кристаллической решетки (кальцит кристаллизуется в гексагональной системе, арагонит – в ромбической). Первый минерал более мягкий, твердость его по шкале Мооса – 3, второй имеет твердость 3,5-4. В доломитизированных известняках и доломитах присутствует минерал доломит –  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Кроме породообразующих минералов в карбонатные породы входят, как правило, глинистые и песчаные примеси.

## 10. Минеральные вяжущие вещества

В зависимости от особенностей кристаллического строения карбонатные породы для получения извести могут быть представлены плотными кристаллическими известняками и доломитами, землисто-рыхлым известняком (мелом), известняком-ракушечником, известковым туфом и др. Физико-механические свойства исходного сырья сказываются на технологии извести. Плотные известняки могут обжигаться как в шахтных, так и вращающихся печах, мягкие и пористые обжигаются во вращающихся печах, печах с “кипящим” слоем и др.

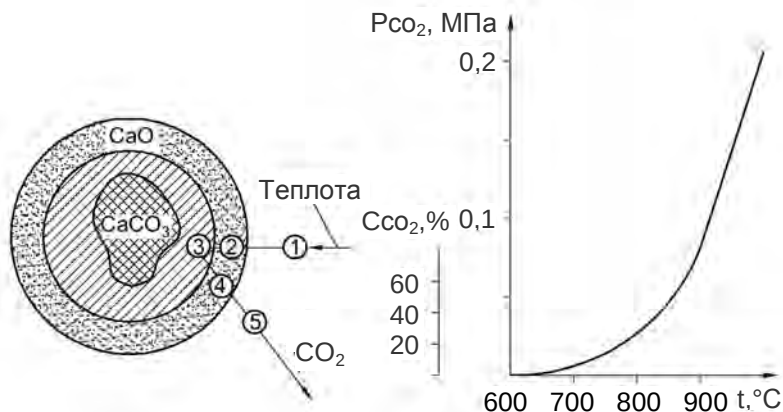


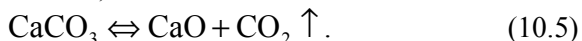
**Рис. 10.4.** Механизм диссоциации  $\text{CaCO}_3$ : 1 – подвод теплоты; 2 – передача теплоты сквозь слой  $\text{CaO}$ ; 3 – химическая реакция на поверхности  $\text{CaCO}_3$ ; 4 – диффузия  $\text{CO}_2$  сквозь слой  $\text{CaO}$ ; 5 – переход  $\text{CO}_2$  в межзерновое пространство

**Рис. 10.5.** Зависимость парциального давления  $\text{CO}_2$  от температуры разложения  $\text{CaCO}_3$

В зависимости от содержания  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  и глинистых примесей ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) известняки разделяют на семь классов. Для производства воздушной извести пригодны известняки классов А и Б с содержанием  $\text{CaCO}_3$  не менее соответственно 92 и 86%,  $\text{MgCO}_3$  – 5 и 6%, глинистых примесей – 3 и 8%. Известняки классов В и Г пригодны для получения менее качественной магнезиальной извести ( $\text{MgCO}_3$  до 20%), классов Д и Е – доломитовой извести

( $\text{MgCO}_3$  до 45%), класса Ж – гидравлической извести (глинистых примесей до 20%).

Основной технологической операцией при получении извести является обжиг карбонатных пород, при котором протекает реакция диссоциации (декарбонизации)  $\text{CaCO}_3$ :



Эта реакция является типичной обратимой эндотермической реакцией, требующей на 1 моль (100 г)  $\text{CaCO}_3$  179 кДж теплоты.

Константа реакции диссоциации  $\text{CaCO}_3$ , учитывая, что  $\text{CaO}$  и  $\text{CaCO}_3$  являются твердыми продуктами, равна парциальному давлению  $\text{CO}_2$  ( $K_{\text{дис}} = P_{\text{CO}_2}$ ). Давление  $\text{CO}_2$  достигает атмосферного т.е. примерно 0,1 МПа ориентировочно при 880°C. При этой температуре, называемой температурой диссоциации, реакция разложения  $\text{CaCO}_3$  интенсивно развивается в направлении образования  $\text{CaO}$  (рис. 10.4, 10.5).

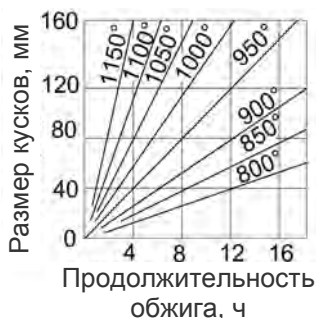


**Рис. 10.6.** Зависимость продолжительности обжига известняка от температуры и величины кусков

Фактическая температура обжига известняков в печах назначается с учетом размеров кусков (рис. 10.6), физических свойств сырья, наличия и вида примесей. Обычно она равна 900-1100°C. С повышением температуры резко ускоряется процесс диссоциации  $\text{CaCO}_3$ , однако увеличиваются размеры кристаллов  $\text{CaO}$ , увеличивается их плотность и уменьшается реакционная способность. Оптимальным будет такой режим обжига, который обеспечивает максимально полное

разложение  $\text{CaCO}_3$  при сохранении достаточно высокой реакционной способности кристаллов  $\text{CaO}$  т.е. способности зерен образуемой извести взаимодействовать с водой и гаситься. Особенно важно не допустить “пережога” при значительном содержании в карбонатных породах  $\text{MgCO}_3$ . Оксид магния, образуемый уже в результате диссоциации  $\text{MgCO}_3$  при 650-700°C, переходит при 1200-1300°C в периклаз, который с водой взаимодействует очень

## 10. Минеральные вяжущие вещества

медленно, обычно после затвердевания известковых растворов, что может приводить к их разрушению.

Глинистые примеси, входящие в состав известняков, вступают в химическое взаимодействие с  $\text{CaO}$ , образуя низкоосновные силикаты, алюминаты и ферриты. При значительном содержании этих соединений в известке она приобретает гидравлические свойства.

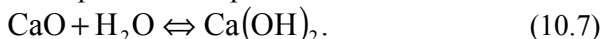
О возможной гидравлическости известки можно судить по значению *модуля основности*:

$$M_0 = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}, \quad (10.6)$$

где  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – процентное содержание соответствующих оксидов.

При  $M_0 > 9$  известь является *воздушной*, 4,5-9 – *слабогидравлической*, 1,7-4,5 – *сильногидравлической*.

В качестве известковых вяжущих наиболее часто используют гашеную известь в виде гидратной известки (пушонки) или известкового теста. *Гашение* известки (рис. 10.7) заключается в обработке ее водой для прохождения реакции гидратации:



Гашение известки возможно как при использовании комовой, так и специально молотой известки. В первом случае гашение известки сопровождается самопроизвольным распадом кусков на тонкодисперсные частицы.

Гашение известки – высокоэкзотермическая реакция, тепловой эффект которой составляет 65 кДж на 1 моль  $\text{CaO}$  (1160 кДж на 1 кг). Процесс гашения ускоряется при использовании мягкообожженной известки, уменьшении размера ее зерен, применении горячей воды или пара, введении добавок хлоридов, сульфатов и др. Неблагоприятно влияют на процесс гашения и качество известки перегрев ее выше  $100^\circ\text{C}$ , применение “пережженной” известки.

Теоретически необходимое для гашения количество воды составляет 32,13% по массе  $\text{CaO}$ . В результате частичного испарения воды при повышении температуры реакции для гашения известки в порошок необходимо 60-80% воды от массы исходного продукта. Для гашения в тесто объем воды возрастает до 200-300% по массе.



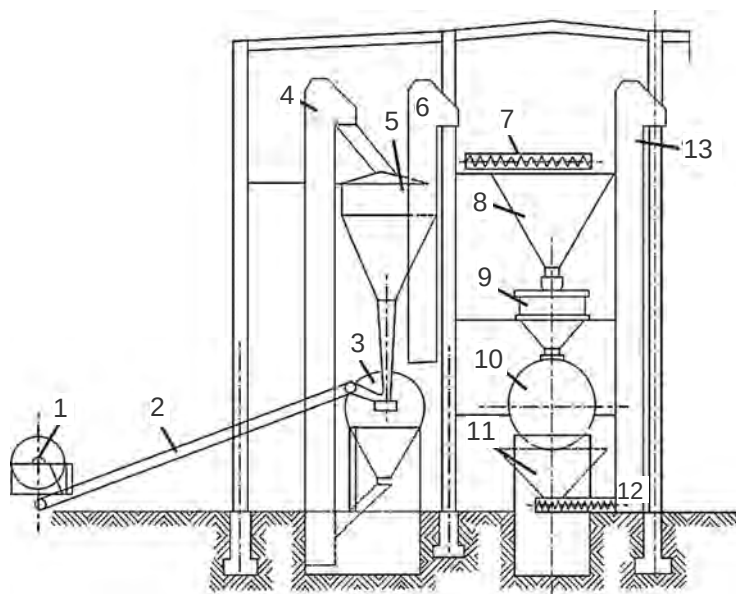


**Рис. 10.7.** Схема установки для гашения извести в пушонку:

1 – щековая дробилка; 2 – конвейер; 3 – шаровая мельница;  
4, 6, 13 – ковшовой элеватор; 5 – сепаратор; 7, 12 – винтовой  
конвейер; 8, 11 – бункер; 9 – дозатор; 10 – гидратор

Гидроксид кальция в гашеной извести образуется в виде высокодисперсных гексагональных пластинок, размер частиц достигает 0,02...0,5 мкм. Объем образующейся гидратной извести в 2-2,5 раза больше объема негашеной извести. Насыпная плотность порошка гашеной извести 400-500 кг/м<sup>3</sup>. Известковое тесто содержит до 50% воды и имеет среднюю плотность 1350-1400 кг/м<sup>3</sup>.

Гашеная известь в известково-песчаных растворах твердеет по т.н. карбонатной схеме.

*Карбонатное твердение* обусловлено одновременным протеканием двух процессов: кристаллизации гидроксида кальция из насыщенного водного раствора и образования карбоната кальция по реакции:



Процесс карбонизации происходит в основном в поверхностных слоях известковых растворов и бетонов и продолжается длительное время. Причинами этого являются низкая проницаемость образовавшейся пленки  $\text{CaCO}_3$ , а также относительно невысокое содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере – около 0,04%. Поэтому в центральных частях слоя известкового раствора длительное время сохраняется  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , который по мере высыхания раствора уплотняется и кристаллизуется.

Карбонизация известковых растворов и бетонов может осуществляться и искусственно в специальных камерах, например, за счет отходящих газов известеобжигательных печей.

Для известково-песчаных (*силикатных*) изделий, подвергаемых тепловлажностной обработке в автоклавах, характерно *гидросиликатное твердение*. В условиях высокой температуры (170-200°C) при тепловлажностной обработке изделий насыщенным паром под давлением 0,9-1,6 МПа резко ускоряются процессы химического взаимодействия гидроксида кальция с кварцевым песком или другими кремнеземсодержащими материалами и образуются *гидросиликаты кальция*. Полученное таким образом гидросиликатное связующее цементирует зерна песка и придает изделиям повышенную прочность. Так, если прочность известково-песчаных растворов с применением гашеной извести, твердеющих в обычных условиях по карбонатной схеме в течение месяца, составляет обычно 0,5-1 МПа, то для известково-песчаных изделий, твердеющих при автоклавной обработке, она достигает 20-30 МПа.

При применении в качестве вяжущего молотой негашеной извести возможно *гидратное твердение* извести. Для реализации гидратного твердения необходимо обеспечить достаточно высокую дисперсность негашеной извести, оптимальное значение водо-известкового отношения и отвод теплоты из зоны реакции. В этом случае, как впервые установлено И.В. Смирновым в 30-х годах XX столетия, предотвращается гашение т.е. бурное прохождение реакции гидратации  $\text{CaO}$  и происходит при образовании  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  процесс твердения растворов. При гидратном твердении представляется возможным в составе молотой извести рационально использовать не только свободный оксид кальция, но и образовавшиеся при обжиге силикаты, алюминаты и ферриты, а также неразложившийся карбонат кальция. В результате меньшей водопотребности по срав-

нению с гашеной известью при применении молотой извести и гидратном твердении существенно возрастают прочность и плотность растворов.

Качество воздушной строительной извести определяется ее составом и прежде всего *активностью* т.е. суммарным содержанием активных (гидратируемых) оксидов  $\text{CaO}$  и  $\text{Mg}$ . В зависимости от этого и ряда других показателей известь делится на сорта (табл. 10.2).

В зависимости от скорости гашения известь разделяют на *быст-рогасящуюся* (до 8 мин), *среднегасящуюся* (8-25 мин) и *медленногасящуюся* (свыше 25 мин).

Основной особенностью извести, являющейся ее преимуществом по сравнению с другими видами вяжущих, является высокая пластичность, обусловленная водоудерживающей способностью тонкодисперсных частиц гидроксида кальция. Высокая пластичность обуславливает широкое применение воздушной извести для кладочных и штукатурных растворов.

Для известково-песчаных растворов особенно на гашеной извести характерны значительные деформации усадки. Неравномерность изменения объема возможна при значительном содержании в извести пережженных уплотнившихся частиц  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$ , гидратируемых в затвердевшем растворе.

В отличие от воздушной извести, твердеющей лишь в воздушно-сухих условиях *гидравлическая известь* после предварительного твердения на воздухе может медленно твердеть в воде. При этом идут реакции взаимодействия с водой силикатов, алюминатов и ферритов с образованием их гидратов. Получают этот вид извести обжигом мергелистых известняков, содержащих 6-25% тонкодисперсных глинистых и песчаных примесей. Продукт обжига подвергают помолу до остатка на сите № 008 не более 5-7%.

Содержание активных  $\text{CaO}+\text{MgO}$  для слабогидравлической извести должно быть не менее 40 и не более 65%, сильногидравлической, соответственно, 5 и 40%. Пластичность гидравлической извести и удобообрабатываемость строительных растворов на ее основе ниже чем воздушной, однако прочность более высокая. Растворы на гидравлической извести через 1 мес. твердения имеют прочность 1,5-2,5 МПа и более.

Технические требования к строительной воздушной извести  
(ГОСТ 9179-77)

| Показатели                                                              | Известь              |    |    |                             |         |         |           |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|----|----|-----------------------------|---------|---------|-----------|----|
|                                                                         | Кальциевая негашеная |    |    | Магнезиальная и доломитовая |         |         | Гидратная |    |
|                                                                         | Сорт                 |    |    |                             |         |         |           |    |
|                                                                         | 1                    | 2  | 3  | 1                           | 2       | 3       | 1         | 2  |
| Содержание активных CaO+MgO в пересчете на сухое вещество, %, не менее: |                      |    |    |                             |         |         |           |    |
| - в извести без добавок                                                 | 90                   | 80 | 70 | 85                          | 75      | 65      | 67        | 60 |
| - в извести с добавками                                                 | 65                   | 55 | -  | 60                          | 50      | -       | 50        | 40 |
| Содержание активной MgO, %, не более                                    | 5                    | 5  | 5  | 20 (40)                     | 20 (40) | 20 (40) |           |    |
| Содержание CO <sub>2</sub> , %, не более                                | 3                    | 5  | 7  | 5                           | 8       | 11      | 3         | 5  |
| Содержание в комовой извести непогасившихся частиц, %, не более         | 7                    | 11 | 14 | 10                          | 15      | 20      | 5         | 5  |
| Влажность извести, %, не более                                          | -                    | -  | -  | -                           | -       | -       | 5         | 5  |
| Остаток на ситах, %, не более                                           |                      |    |    |                             |         |         |           |    |
| № 02                                                                    | -                    | -  | -  | -                           | -       | -       | 7         | 7  |
| № 008                                                                   | -                    | -  | -  | -                           | -       | -       | 15        | 15 |

**Примечание:** В скобках указано содержание  $\text{MgO}$  для доломитовой извести.

**Романцемент. Известесодержащие вяжущие.** Близким по составу и свойствам к гидравлической извести является *романцемент* – гидравлическое вяжущее, получаемое обжигом мергелей с

содержанием не менее 25% глинистых примесей и последующим тонким помолом продукта обжига.

Модуль основности применяемых мергелей 1,1-1,7. Романцемент содержит незначительное (2-3%) количество свободного оксида кальция. При обжиге практически весь  $\text{CaO}$  связывается в двухкальциевый силикат ( $\text{C}_2\text{S}$ ), двухкальциевый алюмосиликат ( $\text{C}_2\text{AS}$ ), четырехкальциевый алюмоферрит ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) и некоторые другие соединения. Твердение романцемента обусловлено гидратацией указанных соединений. Для регулирования свойств этого вяжущего при измельчении в него вводят до 5% гипса и до 15% активных минеральных добавок. Начало схватывания романцемента наступает не ранее 20 мин, а конец – не позднее 24 часов после затворения водой.

Романцемент выпускают марок М25, М50, М100 и М150. Марку определяют по результатам испытаний образцов-кубов состава 1:3 (по массе) в возрасте 28 суток. Растворы и бетоны на романцементе отличаются более высокой стойкостью во влажных условиях и при попеременном увлажнении и высушивании чем материалы на гидравлической извести.

В группу гидравлических *известосодержащих вяжущих* входят материалы, получаемые путем измельчения или смешивания воздушной или гидравлической извести с *активными минеральными добавками* – природными и искусственными веществами, способными при смешивании в тонкоизмельченном виде с известью-пушонкой и затворении водой давать тесто, которое после твердения на воздухе может продолжать твердеть и в воде. Примерами природных активных минеральных добавок являются пеплы, туфы, пемза, трассы, диатомиты, трепелы, опоки, глиежи. К искусственным добавкам можно отнести доменные и топливные шлаки, золы и др.

Способность связывать  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при нормальной температуре (*активность минеральных добавок*) характеризуется количеством поглощенной  $\text{CaO}$  из известковых растворов в течение 30 сут. В известосодержащих вяжущих содержание извести в пересчете на активные оксиды кальция и магния составляет 10-40% по массе.

Твердение этих вяжущих при обычных условиях идет медленно, оно обусловлено взаимодействием гидроксида кальция с активным кремнеземом и образованием гидросиликатов кальция. По прочно-

сти их делят на марки М50, М100, М150 и М200. Интенсивность твердения вяжущих существенно ускоряется при температуре 80-100° С и повышенной влажности. Особенно интенсивно твердеют композиционные известсодержащиеся вяжущие в условиях автоклавной обработки при давлении 0,8-1,5 МПа. Существенным недостатком известсодержащих вяжущих является низкая воздухоустойчивость, повышаемая добавками гипса, хлоридов кальция или натрия, а также при замене воздушной извести гидравлической. Они характеризуются также низкой морозостойкостью. Применять их целесообразно для растворов и бетонов низких марок в подземных или подводных сооружениях и для изготовления изделий с применением тепловлажностной и в особенности автоклавной обработки.

Характерными представителями гидравлических известсодержащих вяжущих являются *известково-зольные вяжущие*. Зола представляет собой пылевидные остатки, образующиеся при сжигании твердого топлива. Размер частиц золы колеблется от 5 до 100 мкм. Различают угольные, сланцевые и торфяные золы. Основная масса

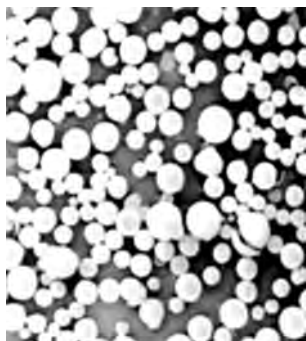


**Рис. 10.8.**  
Стекловидные микро-  
сферы золы-уноса

золы при сжигании топлива уносится с дымовыми газами, улавливается и скапливается в бункерах, откуда удаляется потоком воды или пневмотранспортом. Для получения вяжущих и бетонов предпочтительна зола, поставляемая в сухом виде (*зола-унос*). Химико-минералогический состав золы соответствует составу пустой породы сжигаемого топлива. Удельная поверхность ее колеблется от 1000 до 4000 см<sup>2</sup>/г. Основным компонентом золы-уноса является стекловидная алюмосиликатная фаза (рис. 10.8). В тех случаях, когда минеральная часть топлива содержит значительное количество карбонатов, в золе образуются низкоосновные силикаты, алю-

минаты и ферриты кальция, способные взаимодействовать с водой. В небольшом количестве в золы входят примеси: свободные оксиды кальция и магния, сульфаты, сульфиды и др.

В зависимости от вида и условий сжигания топлива в золе может содержаться 1-20% углерода, как правило, в виде коксовых остатков. Для изготовления вяжущих содержание несгоревшего топлива в золе должно быть минимальным (в каменноугольных золах – не более 10%, в торфяных – 5%), содержание  $\text{SO}_3$  не должно превышать 3%, пережженных  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  – 5%. Способность к самостоятельному твердению проявляют золы, полученные при сжигании отдельных разновидностей горючих сланцев. Из них изготавливают *сланцезольные вяжущие*.

### 10.3. Жидкое стекло. Магнезиальные и фосфатные вяжущие

**Жидкое стекло.** Жидким стеклом называют водный раствор щелочных силикатов. Полуфабрикатом для получения жидкого стекла служит преимущественно *растворимое стекло* – стекловидный сплав, общая формула которого  $\text{R}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ , где  $\text{R}_2\text{O}$  – щелочной оксид,  $n$  – силикатный модуль.

Жидкое стекло можно получать и непосредственно в автоклавах обработкой аморфных кремнеземистых продуктов в растворах едких щелочей.

В строительстве чаще используют натриевое растворимое стекло с модулем 1,5-3. Калиевое стекло с модулем 4-4,5 используют в основном для получения силикатных красок. Выпускают растворимое стекло в виде твердого монолита (*силикат-глыбы*), который измельчают на куски, или мелкозернистого продукта (*силикат-гранулята*). Для его получения используют шихту, в состав которой входят кремнеземистый и щелочной компоненты, например, песок и сода или сульфат натрия. Шихту плавят в стеклоплавильных печах при 1100-1400°C.

Силикат-глыба образуется при медленном охлаждении расплава на воздухе, силикат-гранулят – при охлаждении в проточной воде. Растворение силикат-глыбы в воде проводят в автоклавах под давлением 0,3-0,8 МПа. Гранулят можно растворять при атмосферном давлении и температуре 90-100°C.

Скорость растворения зависит от размера зерен и удельной поверхности, модуля стекла, количества и состава примесей, водотвердого отношения (рис. 10.9, 10.10, 10.11)

## 10. Минеральные вяжущие вещества

Промышленностью изготавливаются три марки жидкого стекла: А – низкомодульное, Б – среднемодульное и В – высокомодульное (табл. 10.3).

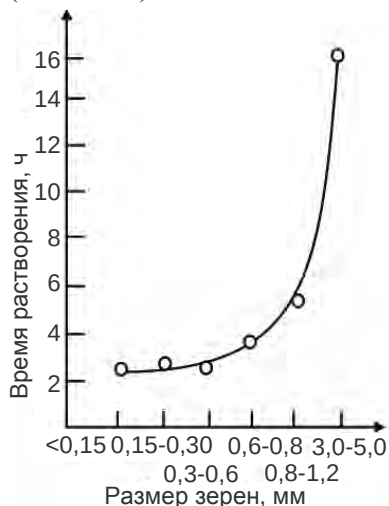


**Рис. 10.9.** Влияние дисперсности силикат-глыбы на скорость растворения

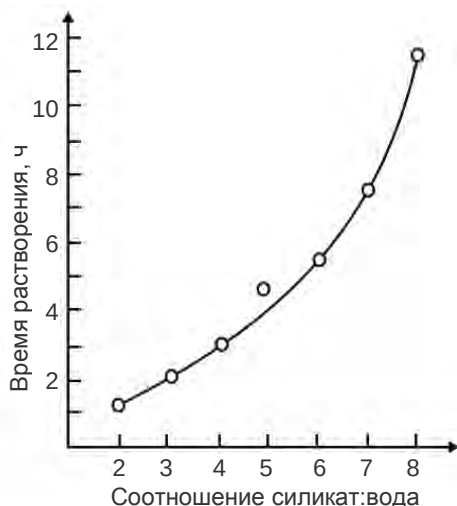


**Рис. 10.10.** Влияние массового соотношения силикат-глыбы и воды на скорость растворения

Жидкое стекло относится к сильным электролитам, находящимся в диссоциированной форме. Для него характерно присутствие в воде катионов щелочных металлов и анионов в виде ассоциированных кремнекислородных комплексов, придающих стеклу свойства, характерные для неорганических полимеров. Они проявляются в его малой склонности к кристаллизации, способности к набуханию и высокой вязкости образующихся растворов. По мере увеличения содержания щелочного оксида и уменьшения соответственно силикатного модуля, степень полимеризации жидкого стекла уменьшается. Меньшая степень полимеризации характерна также при быстром охлаждении растворимого стекла, поскольку при этом имеет место более высокая степень разрушения кремнекислородных комплексов.

Степень полимеризации калиевого стекла ниже, чем натриевого и оно легче растворяется в воде.

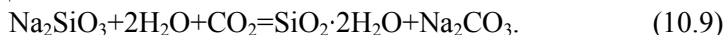


## Марки промышленных жидких стекол

| Характеристика стекла     | Содержание оксидов, % |                   | Модуль n    |
|---------------------------|-----------------------|-------------------|-------------|
|                           | SiO <sub>2</sub>      | Na <sub>2</sub> O |             |
| Низкомодульное (марка А)  | 29,7...30,7           | 12,3...13,2       | 2,31...2,60 |
| Среднемодульное (марка Б) | 30,8...31,9           | 11,0...12,1       | 2,61...3,0  |
| Высокомодульное (марка В) | 32,0...33,1           | 9,8...11,0        | 3,0...3,5   |

Высокомодульные концентрированные растворы силикатов щелочных металлов близки к коллоидным системам. Им присущи такие явления как гелеобразование и коагуляция.

В закрытых емкостях жидкое стекло не твердеет. На воздухе идет медленное твердение в результате взаимодействия щелочного силиката с углекислым газом с образованием геля кремниевой кислоты  $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , образующего искусственный камень. Реакция упрощенно идет по схеме:



Этот процесс проходит весьма медленно из-за образования на поверхности практически непроницаемой пленки.

Наиболее часто встречающийся способ перевода жидкого стекла в твердое состояние заключается в воздействии различных реагентов-отвердителей. С их помощью вяжущей системе можно придать различные технологические и строительно-технические свойства. Одним из способов отверждения является нейтрализация всей или части щелочи, находящейся в жидком стекле, кислотами. Например, нейтрализация жидкого стекла кислотными газами, в том числе углекислым газом используется в литейном деле для приготовления форм и стержней. Песок, очищенный от пыли, смачивается жидким стеклом, из этой смеси формируется изделие, которое отверждается продувкой углекислым газом в течение 0,5-2 мин. После продувки углекислым газом литейные формы просушиваются нагретым воздухом.

К жидким отвердителям относятся сложные эфиры органических кислот, а также эфиры угольной и кремниевой кислот, омыляющиеся под действием щелочи жидкого стекла. Особое место среди от-

вердителей занимают фторсиликаты щелочных металлов. На практике с этой целью применяют преимущественно кремнефторид натрия  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ . При его взаимодействии с жидким стеклом не только понижается содержание щелочи, но и выделяется дополнительная кремниевая кислота, которая уплотняет твердеющую систему, повышая в конечном счете ее прочность:



Введение порошка  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  в натриевое жидкое стекло сразу вызывает коагуляцию и гелеобразование. Поэтому порошок кремнефторида натрия обычно предварительно смешивают с наполнителем, а затем уже с жидким стеклом.

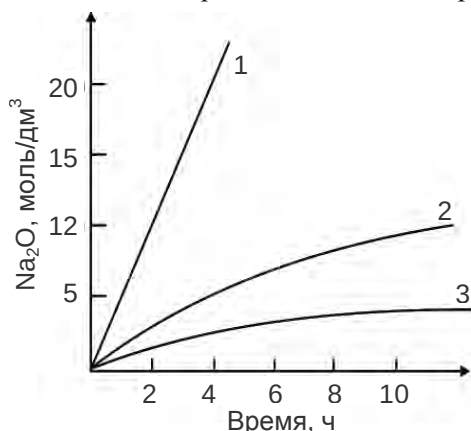


**Рис. 10.11.** Влияние модуля на скорость растворения натриевого растворимого стекла:

1 –  $n=1$ ; 2 –  $n=2$ ; 3 –  $n=3$

Отверждение жидкого стекла возможно соединениями кальция и других двухвалентных ионов. С помощью ионов кальция из растворов жидкого стекла осаждаются аморфные силикаты кальция и происходит коагуляция силикатного раствора. Из солей кальция для отверждения жидкого стекла

наибольшее применение находит  $\text{CaCl}_2$ .

Жидкие стекла затвердевают при умеренном нагревании по мере увеличения вязкости при понижении содержания воды до 20...30%. При этом важен темп нагревания. Если условия нагревания такие, что давление насыщенного пара в глубинных слоях стекла окажется выше атмосферного, происходит вспучивание материала. Этим явлением пользуются для получения пористых материалов.

Одной из основных особенностей жидкого стекла является высокая адгезионная (клеющая) способность. Она в 3-5 раз выше, чем у портландцемента и других вяжущих материалов. Силикатные растворы с модулями ниже 3,5-3,7 хорошо смачивают разнообразные неорганические и органические материалы. Для получения компо-

зиционных материалов высокой прочности на основе жидкого стекла в качестве наполнителей используют разнообразные дисперсные материалы.

Область применения жидкого стекла достаточно обширна. Его вяжущие свойства используются при получении ряда композиционных материалов, в том числе кислотостойких и жаростойких растворов и бетонов, литейных формовочных смесей, теплоизоляционных, керамических, абразивных материалов. Жидкое стекло применяют в качестве неорганического клея (*связки-адгезива*) в инъекционных составах для укрепления грунтов и горных пород, высокотемпературных клеящих композициях для металлов, керамики, стекла, составах для пропитки пористых строительных изделий. Важным направлением применения жидкого стекла является также получение защитно-декоративных и антикоррозионных покрытий.

Наилучшие вяжущие свойства натриевого жидкого стекла характерны при силикатном модуле 2-3,5, калиевого 2,5-4. При повышении силикатного модуля выше 3,3 существенно увеличивается водостойкость жидкого стекла, которое можно отнести к вяжущим воздушного твердения. Прочность жидкостекольных композитов возрастает с увеличением плотности раствора стекла (до 1,5 г/см<sup>3</sup> и выше). Вместе с тем, с увеличением плотности резко возрастает вязкость растворов и затрудняется получение удобообрабатываемых смесей.

Адгезионные и соответственно клеящие свойства более выражены для натриевых жидких стекол. Применение натриевых стекол для получения фасадных покрытий ограничено из-за возможности появления на их поверхности белых высолов. Для получения таких покрытий более предпочтительно применение калиевого жидкого стекла. Оно в отличие от натриевого не образует кристаллогидратов с сульфат- и карбонат-ионами.

Для закрепления грунта под фундаментами, защиты от грунтовых вод при прохождении шахт и тоннелей применяют *силикатизацию* - нагнетание в грунт жидкого стекла вместе с растворами добавок сквозь систему перфорированных труб.

Жидкое стекло служит затворителем *кварцевых кислотостойких цементов* – продуктов совместного измельчения или смешивания кварцевого песка и кремнефтористого натрия. Изготавливают два типа таких цементов: I – для кислотостойких замазок, II – для бетонов

## 10. Минеральные вяжущие вещества

и растворов. Они отличаются содержанием кремнефтористого натрия и сроками твердения. Кислотостойкие цементы нельзя использовать в условиях действия щелочей, фтористоводородной и кремнийфтористоводородной кислот, кипящей воды и водяного пара.

Отличительной особенностью растворов и бетонов на основе жидкого стекла наряду с кислотостойкостью является также высокая жаростойкость.

**Магнезиальные вяжущие.** Магнезиальные вяжущие (каустический магнезит и каустический доломит) относятся к группе вяжущих воздушного твердения, получаемых на основе продуктов умеренного обжига магнезита и доломита, содержащих активный оксид магния, при их затворении растворами хлорида магния и некоторых других солей.

В основе получения *каустических магнезита* и *доломита* лежат реакции термической диссоциации соответствующих минералов, в результате которых образуется активный оксид магния. Эти реакции являются эндотермическими и идут при обжиге сырьевых материалов в определенном диапазоне температур.

Реакция разложения магнезита  $\text{MgCO}_3 = \text{MgO} + \text{CO}_2 \uparrow$  протекает достаточно интенсивно при 600-650°C с затратой 1440 кДж теплоты на 1 кг  $\text{MgCO}_3$ . В промышленных печах каустический магнезит получают при температурах 800-850°C. При более высоких температурах кристаллы  $\text{MgO}$  уплотняются и переходят в неактивную форму – *периклаз*. Если плотность каустического магнезита 3,1-3,3 г/см<sup>3</sup>, то плотность периклаза достигает 3,7 г/см<sup>3</sup>.

Получение каустического доломита идет в результате разложения магнезиальной составляющей доломита. Предложен ряд схем диссоциации этого минерала при нагревании. Характер образующихся продуктов при диссоциации зависит от давления  $\text{CO}_2$  и температуры. При давлении  $\text{CO}_2$  более 20 мм рт. ст. и температуре 650-750 °C идет реакция по схеме:



При последующем нагревании до 900°C разлагается карбонат кальция.

Наряду с магнезиальными вяжущими, получаемыми целенаправленно обжигом и помолом магнезиального сырья, в качестве вяжущего используют побочный продукт металлургического производства – каустический магнезитовый порошок, улавливаемый в

виде пыли, образующейся при производстве спеченного огнеупорного материала – периклаза. Кроме производства вяжущих материалов, каустический магнезитовый порошок применяют для химической, стекольной, энергетической и других отраслей промышленности.

При затворении магнезиальных вяжущих водой их прочность незначительна. Наиболее высокую прочность они достигают при затворении раствором хлорида магния с плотностью 1,15-1,20 г/см<sup>3</sup>. С повышением плотности раствора и соответственно концентрации хлорида магния прочность конечного продукта растет, однако увеличивается опасность высолов на поверхности изделий.

Имеются различные теоретические представления о механизме твердения магнезиальных вяжущих. В соответствии с гидратационной теорией твердения А.А. Байкова роль солей-электролитов, вводимых при затворении, сводится к увеличению растворимости  $Mg(OH)_2$ , образуемого при гидратации  $MgO$ . Различие в растворимости  $MgO$  и  $Mg(OH)_2$  приводит к увеличению степени пересыщения и развитию процессов кристаллизации и образования искусственного камня.

Большинство исследователей в настоящее время считают, что твердение магнезиальных вяжущих идет, главным образом, в результате образования комплексных солей типа *оксихлоридов*  $mMgO \cdot MgCl_2 \cdot nH_2O$ , где  $m=1-10$ ;  $n=10-21$ .

Особенностью твердения каустического доломита является присутствие значительного количества высокодисперсного  $CaCO_3$ , который выполняет роль активного наполнителя, образуя центры кристаллизации и повышая плотность затвердевших вяжущих.

Магнезиальные вяжущие, затворяемые раствором хлористого магния плотностью 1,15-1,20 г/см<sup>3</sup>, являются быстротвердеющими, нормально схватывающимися вяжущими.

При высоком качестве магнезитового сырья растворы на каустическом магнезите могут достигать через 28 сут прочность при сжатии 80-100 МПа. При этом через 1 сут достигается растворами 30-50%, 7 сут – 60-90% 28-суточной прочности при твердении образцов в воздушно-сухих условиях.

Прочность магнезиальных вяжущих пропорциональна содержанию активного  $MgO$ .

Защита изделий из магнезиальных вяжущих достигается пропиткой их различными гидрофобизирующими составами: серой, парафином, лаками. Наиболее сильно повышают водостойкость и механическую прочность магнезиальных вяжущих фосфатные добавки.

Традиционно магнезиальные вяжущие применяют для материалов, содержащих древесный наполнитель или другие волокнистые органические материалы. Типичными материалами этого типа являются ксилолит («дерево-камень», греч.) и фибролит («волокнистый камень», греч.).

*Ксилолит* как материал для полов на основе магнезиального вяжущего и древесных опилок отличается прочностью, упругостью, несгораемостью, низкой тепло- и звукопроводностью, паропроницаемостью, стойкостью к биоповреждениям, низкой истираемостью. Средняя плотность ксилолита характерных составов 1000-1250 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии 20-35 МПа, растяжении 3-5 МПа, коэффициент теплопроводности 0,5-1 Вт/м·°С, водопоглощение 3-7%, истираемость до 0,1 г/см<sup>2</sup>.

*Фибролитовые плиты*, получаемые с использованием древесных стружек, применяют в качестве теплоизоляционного (с плотностью до 300 кг/м<sup>3</sup>) и конструктивно-теплоизоляционного материала (с плотностью 400-500 кг/м<sup>3</sup>).

В последнее десятилетие освоено производство т.н. *бишофитового бруса (экобруса)* – композитного материала на основе магнезиального вяжущего, древесных отходов и *бишофита* – технического хлорида магния.

С применением магнезиальных вяжущих изготавливают отделочные растворы и изделия. Освоено производство *ксилолитово-волокнистых (стекломагнезитовых) плит* – материала, получаемого на основе смеси магнезиального вяжущего и древесной стружки, армированного с обеих сторон стеклотканью.

**Фосфатные цементы.** К фосфатным цементам относится большая группа вяжущих систем, в состав которых входят различные оксиды или другие тонкодисперсные вещества и фосфорная кислота.

Их подразделяют на «простые» вяжущие системы, включающие фосфорную кислоту и мономинеральные соединения, представленные преимущественно оксидами, и вяжущие системы с использованием полиминеральных природных и техногенных продуктов. Они

могут отверждаться при комнатной температуре или при нагревании.

Твердение фосфатных цементов возможно при условии химического взаимодействия минеральных порошков с фосфорнокислым отвердителем.

Химическое взаимодействие оксидов с фосфорной кислотой и образование искусственного камня зависит, как показали С.Л. Голышко-Вольфсон и Л.Г. Судакас, от ионного потенциала катиона, входящего в оксид, — отношения заряда иона к его эффективному радиусу. При уменьшении ионного потенциала катиона ускоряется процесс схватывания и твердения, с увеличением — замедляется (табл. 10.4).

Таблица 10.4

Условия проявления вяжущих свойств в системах  
оксид-фосфорная кислота

| Оксиды                                                                                                                                                                                                   | Ионный потенциал<br>$z/r^*$ | Условия проявления<br>вяжущих свойств                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,<br>ZrO <sub>2</sub> , MnO <sub>2</sub> ,<br>Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,<br>SnO <sub>2</sub> | 5...10                      | Требуется активизация процесса кислотно-основного взаимодействия         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,<br>NiO <sub>2</sub> , CoO, FeO,<br>CaO                                                                                                 | 2,5...4,5                   | Твердение при нормальных условиях                                        |
| LaO <sub>3</sub> , MgO, ZnO,<br>CdO                                                                                                                                                                      | 2...3                       | Требуется замедление процесса кислотно-основного взаимодействия          |
| CaO, SrO, BaO,<br>PbO                                                                                                                                                                                    | 1,4...2                     | Требуется чрезвычайные меры пассивации кислотно-основного взаимодействия |

\*  $z$  — заряд катиона;  $r$  — радиус катиона.

Для твердения вяжущих при использовании низкорреакционных оксидов повышают температуру, применяют методы поверхностной активации порошков. При необходимости снижения интен-

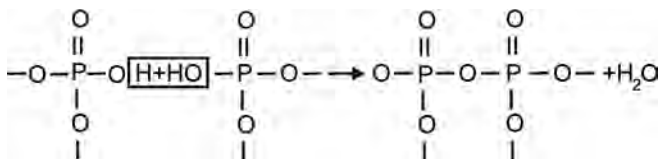
## 10. Минеральные вяжущие вещества

сивности взаимодействия охлаждают систему, прокаливают порошок, производят предварительную нейтрализацию затворителя и др.

Исследования показали, что прочность в системах типа оксид (гидроксид) – ортофосфорная кислота зависит от размера катиона оксида. Наиболее прочные структуры соответствуют оптимальным размерам катиона (0,7-0,8 мм). Более прочными являются также системы, в которых при твердении достигается оптимальное сочетание между кристаллическими и аморфизированными продуктами.

Способность твердеть и превращаться в искусственный камень для фосфатов обусловлена процессами поликонденсации, в результате которых могут образовываться структуры линейных, кольцевых и ячеистых полифосфатов.

Процесс поликонденсации фосфатов с соответствующим усложнением анионов и выделением воды можно представить схемой:



В последние годы разработан ряд быстротвердеющих и высокопрочных фосфатных вяжущих композиций. К ним относят прежде всего *магнийаммонийфосфатные цементы*, твердение которых связано с взаимодействием оксида магния с водными растворами аммонийфосфатов. Использование в вяжущих системах аммонийфосфатов существенно улучшает их физико-механические характеристики. Оксид магния обжигают при температуре выше 1300°C.

Обширной группой в составе *алюмофосфатных вяжущих* являются материалы с активными глиноземсодержащими компонентами. С применением алюмофосфатной связки  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$  и кварцевых, шамотных и других огнеупорных компонентов можно получить высококачественные огнеупорные бетоны.



## 10.4. Шлаковые вяжущие

*Шлаки* – побочные продукты высокотемпературных процессов выплавки металлов, сжигания твердого топлива, а также некоторых химических производств. Metallургические шлаки образуются при взаимодействии топлива, пустой породы, содержащейся в руде и плавней. Их подразделяют на шлаки черной и цветной металлургии.

В зависимости от характера процесса и типа печей среди шлаков черной металлургии различают доменные, сталеплавильные (мартеновские, конвертерные, бессемеровские и томасовские, ваграночные, электроплавильные) и производства ферросплавов. Наибольшим является выход доменных шлаков – на 1 т чугуна он составляет 0,6-0,7 т. При выплавке стали выход шлаков значительно меньше: на 1 т стали – 0,2-0,3 т при мартеновском способе; 0,1-0,2 т – бессемеровском и томасовском и 0,1-0,04 т при выплавке стали в ваграночных и электропечах.

В цветной металлургии шлаки получают при выплавке меди, свинца, никеля, олова и др. При этом выход шлаков на 1 т цветного металла составляет 15-25 т.

Химическим анализом metallургических шлаков установлено, что в их составе преобладают четыре оксида:  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$ . Кроме того, в metallургических шлаках в небольшом количестве всегда содержатся оксиды железа и марганца, а также сернистые соединения.

При оценке шлаков как сырья для строительных материалов важной характеристикой их химического состава является процентное соотношение основных и кислотных оксидов – модуль основности ( $M_o$ ). При  $M_o > 1$  шлаки относят к основным, при  $M_o < 1$  – к кислотным.

Оксиды, входящие в шлаки, образуют разнообразные минералы. Анализом диаграмм состояния соответствующих систем оксидов установлена возможность существования в шлаках до 40 двойных и тройных соединений, ведущее положение среди которых занимают силикаты, алюмосиликаты, алюминаты и ферриты.

При медленном охлаждении в шлаках кристаллизуются *двухкальциевый силикат* –  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , *ранкинит* –  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 (\text{C}_3\text{S}_2)$  и твердые растворы *геленита*  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_2\text{AS})$  и *окерманита*

$2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 (\text{C}_2 \text{MS}_2)$  – *мелилиты*. При повышенном содержании  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  присутствуют также *анортит*  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 (\text{C}_2\text{AS}_2)$  и *псевдоволластонит*  $\alpha\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\alpha\text{-CS})$ .

Практически во всех металлургических шлаках в том или ином количестве наряду с продуктами кристаллизации содержится стекловидная фаза. В отвальных медленно охлажденных основных шлаках количество стекла незначительно, а в гранулированных доменных шлаках оно достигает 98%. Стекло, являясь термодинамически неустойчивой фазой, в значительной мере определяет химическую активность шлаков. Установлено, что шлаковые стекла взаимодействуют с водой значительно интенсивнее, чем кристаллы минералов.

Из всех видов металлургических шлаков наиболее широко применяются в производстве строительных материалов *доменные шлаки*, что обусловлено их ведущим положением в общем балансе, способностью при быстром охлаждении приобретать гидравлические свойства и др. Основную массу доменных шлаков получают при выплавке передельных и литейных чугунов.

Оценка гидравлических свойств доменного гранулированного, шлака определяется при помощи коэффициента качества  $K$ , определяемого по формулам:

- при содержании  $\text{MgO}$  до 10%:

$$K = \frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2}; \quad (10.12)$$

- при содержании  $\text{MgO}$  более 10%:

$$K = \frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 10}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + (\text{MgO} - 10)}. \quad (10.13)$$

Способность шлаков при затворении водой схватываться и твердеть при определенных температурно-влажностных условиях зависит от их химического и фазового состава. При обычной температуре и без активизирующих добавок измельченные шлаки практически не обладают способностью твердеть, что объясняется отсутствием или низким содержанием в них в данных условиях достаточно активных фаз. Практически единственным кристаллическим компонентом шлаков, способным хотя и медленно, но твердеть при нормальной температуре, является  $\beta$ -двухкальциевый силикат. Ряд других минералов, приобретает гидравлические свойства лишь в

условиях повышенной температуры и давления, водяного пара в присутствии активизаторов. Значительно интенсивнее, чем кристаллы минералов, взаимодействуют с водой шлаковые стекла. Высокая внутренняя химическая энергия стекла обеспечивает его повышенную растворимость, результатом чего является образование пересыщенных растворов, их кристаллизация и, как следствие последней, затвердевание и образование искусственного камня.

Механизм гидратации шлаковых стекол заключается в проникновении в стекло отрицательно заряженных гидрофильных ионов, нарушающих электростатическое равновесие системы и приводящих к разрушению шлака. При обычных условиях без активизирующих добавок гидратации препятствует образование на поверхности частичек стекла пленок гидратированного кремнезема. Разрушению этих пленок и обнажению новых поверхностей шлаковых зерен способствует введение в водный раствор щелочных соединений и сульфатов, содержащих ионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $(\text{OH})^-$  и  $(\text{SO}_4)^{2-}$ . При *щелочной активизации* гидратированный кремнезем связывается в гидросиликаты и гидроалюмосиликаты кальция, при *сульфатной* – сульфат кальция непосредственно взаимодействует с глиноземом, гидроксидом кальция и водой с образованием гидросульфоалюминатов. Эффект щелочной и сульфатной активизации увеличивается с повышением основности шлаков. При сульфатном возбуждении активность шлаков растет также по мере увеличения их алюминатности. Роль щелочных активизаторов могут выполнять известь, щелочи, сода и другие соли щелочных металлов и слабых кислот, портландцемент, а сульфатных – двуводный или полуводный гипс, ангидрит, сульфат натрия.

Повышение гидравлической активности шлаков вызывает тонкое измельчение шлаков и увеличение в связи с этим реагирующей поверхности их зерен. Но особенно сильно действует на проявление вяжущих свойств шлаков химическая активизация и тепловлажностная обработка в автоклавах.

*Бесклинкерные шлаковые вяжущие* – это продукты тонкого измельчения шлаков, содержащих добавки активизаторов их твердения. Активизаторы тщательно смешивают со шлаком или их совместным измельчением (сульфатно-шлаковые, известково-шлаковые вяжущие), или затворением водными растворами (шлакощелочные вяжущие).

*Сульфатношлаковые цементы* – гидравлические вяжущие вещества, получаемые совместным тонким измельчением доменных гранулированных шлаков и сульфатного возбuditеля твердения – гипса или ангидрита с небольшой добавкой щелочного активизатора – извести, портландцемента или обожженного доломита (рис.10.12). Наиболее широкое распространение из группы сульфатно-шлаковых получил *гипсошлаковый цемент*, содержащий 75-85% шлака, 10-15% двухводного гипса или ангидрита, до 2% оксида кальция или 5% портландцементного клинкера. Высокая активизация обеспечивается при использовании ангидрита, обожженного при температуре около 700°C, и высокоглиноземистых основных шлаков.

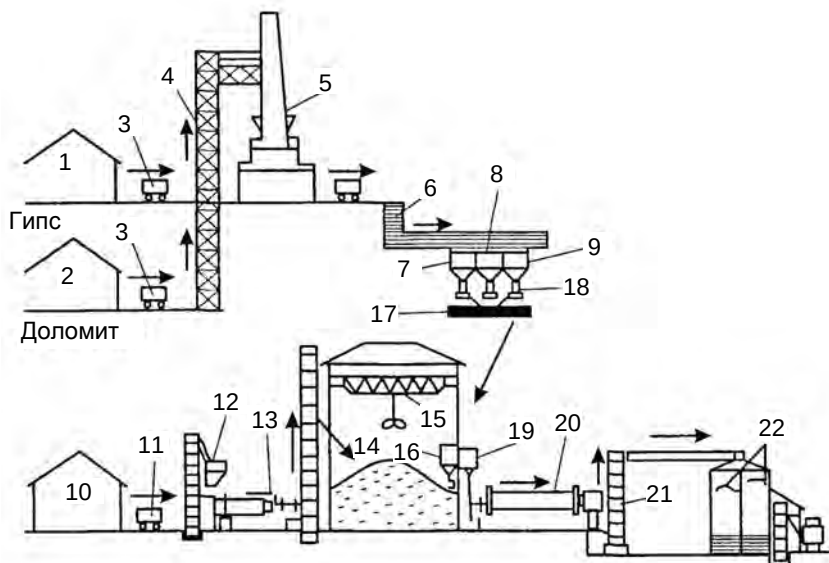


**Рис. 10.12.** Схема производства сульфатно-шлакового цемента при использовании обожженного доломита:

- 1 – склад доломита; 2 – склад гипса; 3 – вагонетка; 4 – подъемник печи; 5 – шахтная печь для обжига доломита; 6 – дробилка; 7 – бункер обожженного доломита; 8 – бункер ангидрита; 9 – бункер гипса; 10 – склад мокрого шлака; 11 – вагонетка; 12 – приемный бункер сушильного барабана; 13 – сушильный барабан; 14 – склад сухого шлака; 15 – грейферный кран; 16 – бункер шлака над мельницей; 17 – шнек; 18 – питатель; 19 – бункер добавок; 20 – шаровая мельница; 21 – элеватор; 22 – силосы сульфатно-шлакового цемента

Другой разновидностью сульфатно-шлаковых цементов является *шлаковый бесклинкерный цемент*, состоящий из 85-90% шлака, 5-8% ангидрита и 5-8% обожженного доломита. Степень обжига доломита зависит от основности шлаков. Для основных шлаков обжиг ведут при температуре 800-900°C до частичного разложения  $\text{CaCO}_3$ , а для кислых – при 1000-1100°C до полной диссоциации  $\text{CaCO}_3$ .

Активность сульфатно-шлакового цемента существенно зависит от тонкости измельчения. Недостатком сульфатно-шлаковых цементов является быстрое снижение активности при хранении, характерным для этого вяжущего является связывание повышенного количества воды при гидратации. Последнее вызывает в бетонах значительный сдвиг оптимальных В/Ц в сторону больших значений (до 0,5-0,65), Пониженная пластичность сульфатно-шлаковых цементов обуславливает существенное снижение прочности бетонов на их основе по мере отощения, т.е. увеличения содержания заполнителей. Оптимальная температура твердения этих цементов 20÷40°C – при более низких и более высоких температурах прочность существенно снижается. Как и другие шлаковые вяжущие сульфатно-шлаковый цемент, имеет небольшую теплоту гидратации к 7 сут., что позволяет применять его при возведении массивных гидротехнических сооружений. Этому способствует также его высокая стойкость к воздействию мягких и сульфатных вод.

*Известково-шлаковые вяжущие* – гидравлические вяжущие вещества, получаемые совместным помолом доменного гранулированного шлака и извести. Они были первыми шлаковыми вяжущими, использованными в строительстве. Их применяют для приготовления строительных растворов и низкомарочных бетонов. Для регулирования сроков схватывания и улучшения других свойств этих вяжущих при изготовлении их вводится до 5% гипсового камня. Известково-шлаковые вяжущие более высокого качества можно получить, применяя основные шлаки с повышенным содержанием глинозема и негашеную известь. Содержание извести составляет 10-30%.

Известково-шлаковые вяжущие по прочности уступают сульфатно-шлаковым. При снижении температуры, особенно после 10°C, нарастание прочности резко замедляется и, наоборот, повышение температуры при достаточной влажности среды способствует интенсивному твердению. Твердение на воздухе возможно лишь

после достаточно продолжительного твердения (15-30 сут.) во влажных условиях. Для известково-шлаковых вяжущих характерна низкая морозостойкость, высокая стойкость в агрессивных водах и малая экзотермия.

*Шлаковые вяжущие для бетонов автоклавного твердения* - продукты тонкого измельчения мартеновских, ваграночных и некоторых других низкоактивных при нормальном твердении шлаков с активизаторами твердения, которыми служат цемент или известь (10-20 %) и гипс (3-5%). Их активность особенно проявляется при тепловлажностной обработке в автоклавах под давлением 0,8-1,5 МПа при температуре 174,5-200°C. Прочность при сжатии автоклавированных образцов из пластичных растворов состава 1:3 достигает 20-30 МПа и более. Получают их в основном так же, как известково- и сульфатно-шлаковые вяжущих. Размалывают шлаковые вяжущие до остатка на сите – № 008 не более 10-15 %.

*Шлакощелочные вяжущие* – гидравлические вяжущие вещества, получаемые измельчением гранулированных шлаков совместно со щелочными компонентами или затворением молотых шлаков растворами соединений щелочных металлов (натрия или калия), дающих щелочную реакцию (рис. 10.13).

Шлакощелочные вяжущие предложены и исследованы под руководством В.Д. Глуховского в Киевском национальном университете строительства и архитектуры.

Для получения шлакощелочных вяжущих применяют гранулированные шлаки – доменные, электротермофосфорные, цветной металлургии. Необходимое условие активности шлаков – наличие стекловидной фазы, способной взаимодействовать со щелочами. Тонкость помола должна соответствовать удельной поверхности не менее 3000 см<sup>2</sup>/г.

В качестве щелочного компонента применяют каустическую и кальцинированную соду, поташ, растворимое стекло и др. Используют также попутные продукты промышленности: плав щелочей (содовое производство); содощелочной плав (производство капролактама); содопоташную смесь (производство глинозема); цементную пыль и т.п. Оптимальное содержание щелочных соединений в вяжущем в пересчете на Na<sub>2</sub>O составляет 2-5 % массы шлака.

Для шлаков с модулем основности ( $M_o$ ) больше единицы могут применяться все щелочные соединения или их смеси, дающие в во-

де щелочную реакцию, для шлаков с  $M_0 < 1$  только едкие щелочи и щелочные силикаты с модулем 0,5-2, несиликатные соли слабых кислот и их смеси могут быть использованы только в условиях тепловлажностной обработки. Наличие щелочей интенсифицирует разрушение и гидролитическое растворение шлакового стекла, образование щелочных гидроалюмосиликатов и создание среды, способствующей образованию и высокой устойчивости низкоосновных кальциевых гидросиликатов. Малая растворимость новообразований, стабильность структуры во времени являются решающими условиями долговечности шлакощелочного камня.

Начало схватывания этих вяжущих не ранее 30 мин, а конец – не позже 12 ч от начала затворения.

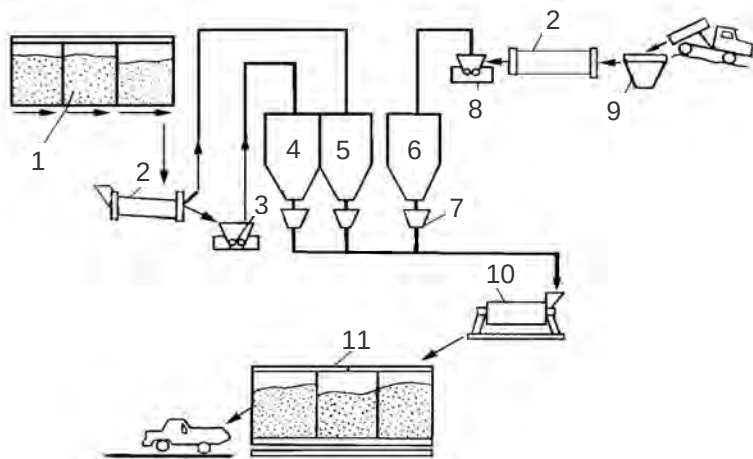


**Рис. 10.13.** Схема производства шлакощелочного вяжущего: 1 – склад; 2 – сушильный барабан; 3 – вальцы; 4, 5 – расходные бункеры шлака и активной минеральной добавки; 6 – расходный бункер щелочного компонента; 7 – дозаторы; 8 – вальцы для измельчения щелочного компонента; 9 – склад щелочного компонента; 10 – мельница; 11 – склад вяжущего

Предел прочности при сжатии быстротвердеющего шлакощелочного вяжущего в возрасте 3 сут. для марок М400 и М500 составляет не менее 50% марочной прочности, а для марок М600 и более – не менее 30 МПа.

Шлакощелочные вяжущие интенсивно твердеют как при нормальном твердении, так и при тепловлажностной обработке, а также при пониженных температурах, обладают высокой коррозионной стойкостью.

### 10.5. Портландцемент

*Портландцемент* – гидравлическое вяжущее вещество, твердеющее в воде и на воздухе, получаемое путем совместного тонкого измельчения клинкера с гипсом и при необходимости, с другими добавками. *Портландцементный клинкер* – продукт спекания сырьевой смеси определенного химического состава, обеспечивающего преобладание после обжига высокоосновных силикатов кальция.

**Получение портландцемента.** Основными технологическими операциями производства цементного клинкера являются: разработка и подготовка сырьевых материалов, включающие добычу, измельчение и при необходимости их сушку; получение однородной сырьевой смеси при совместном измельчении и смешивании компонентов; обжиг сырьевой смеси до спекания, обеспечивающего прохождение физико-химических процессов клинкерообразования, и охлаждение.

Различают два основных способа получения клинкера – мокрый и сухой. При *мокром способе* сырьевая смесь подготавливается и обжигается в виде водной суспензии – шлама с влажностью 35-42%. *Сухой способ* предусматривает высушивание материалов до их совместного измельчения. Сырьевая смесь при сухом способе поступает на обжиг в порошкообразном или гранулированном виде. Первым получил распространение мокрый способ производства клинкера (рис. 10.14). Этому способствовало достижение при мокром способе высокой однородности сырьевой смеси, что благоприятно отражается на качестве клинкера. Вместе с тем при сухом способе производства затраты теплоты примерно в 1,5-2 раза ниже, чем при мокром, и могут достигать 3140 кДж/кг. В настоящее время благодаря созданию эффективных конструкций клинкерообжигательных печей сухой способ получает более широкое распространение.

Разработаны также технологии *комбинированного способа* получения клинкера, при котором подготовка сырьевой смеси осуществ-



ляется по мокрому способу с последующим обезвоживанием шлама методом фильтрации или сушки в запечных аппаратах.

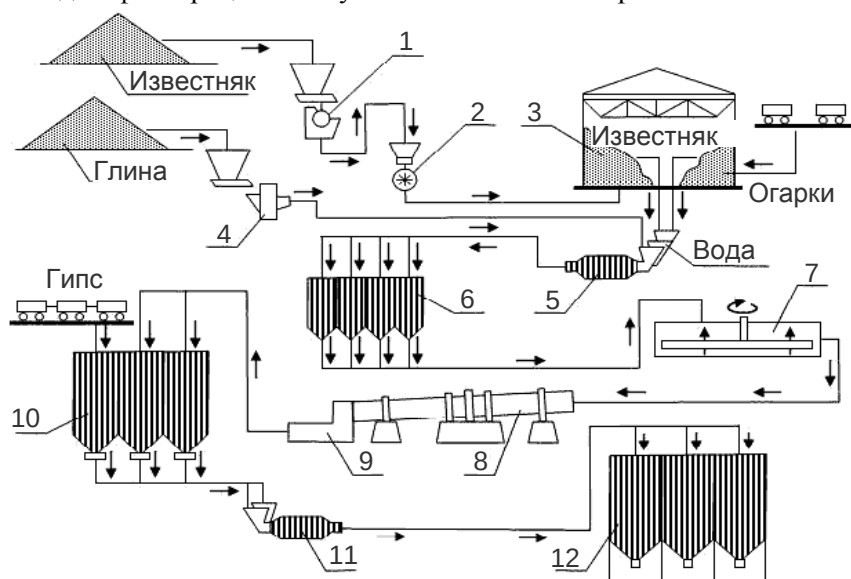


**Рис. 10.14.** Технологическая схема получения цемента по мокрому способу: 1 – щековая дробилка; 2 – молотковая дробилка; 3 – склад сырья; 4 – мельница «Гидрофол»; 5 – мельница мокрого помола; 6 – вертикальный шламбассейн; 7 – горизонтальный шламбассейн; 8 – вращающаяся печь; 9 – холодильник; 10 – клинкерный склад; 11 – мельница; 12 – силос цемента

Основная масса клинкера на заводах, работающих по мокрому способу, обжигается в печах  $4,5 \times 170$  и  $5 \times 185$  м. Они имеют проектную производительность соответственно 1200 и 1800 т в сутки. На некоторых заводах работают печи и других типоразмеров и соответственно производительности.

В печной агрегат входит корпус – вращающийся сварной стальной барабан, футерованный изнутри огнеупорными материалами с встроенными теплообменными устройствами, шламовый питатель, аппараты для подачи топлива в печь, пылеочистительные устройства, дымосос.

Вращающиеся печи работают по принципу противотока. Сырьевая смесь поступает в печь с верхнего (холодного конца), а со сто-

## 10. Минеральные вяжущие вещества

---

роны нижнего (горячего) конца вдувается топливо, сгорающее на протяжении 20-30 м длины печи. Горячие газы, перемещаясь навстречу материалу, нагревают его до требуемой температуры. В качестве внутренних теплообменных устройств, служат *цепные завесы*, имеющие высокоразвитую поверхность. Их применяют на участке печи в зоне сушки шлама. Цепные завесы повышают производительность и снижают расход топлива до 10%.

Клинкер выходит из печи с температурой 1000-1100°C и поступает в холодильник. На современных печах применяют колосниковые переталкивающие холодильники, осуществляющие охлаждение клинкера до 50-60°C при двойном просасывании воздуха через его слой на колосниковой решетке.

Работа вращающихся печей сопровождается значительным пылевыносом, который может достигать 20% и более по отношению к сухому сырью. При выходе из печи газы с температурой 150-200°C направляются через пылесадительную камеру в электрофильтры, позволяющие обеспечивать степень очистки отходящих газов 96-98% и доводить содержание пыли до концентрации, предусмотренной санитарными нормами. Очищенные от пыли газы с помощью дымососа выбрасываются через дымовую трубу. Пыль из отходящих газов, осажденная электрофильтрами, при помощи системы шнеков или других устройств собирается и с помощью пневматических насосов подается в приемное устройство для возврата в печь. Способ возврата пыли в печь (со стороны холодного конца печи, за цепную завесу, в гранулированном виде) выбирается с учетом свойств сырья и топлива. Возможны и другие способы использования пыли клинкерообжигательных печей: для получения местных вяжущих, калийных удобрений и др.

Полученный в печах клинкер подвергают дроблению и направляют в клинкерный склад, где он окончательно охлаждается и магзинируется, что обеспечивает гашение свободной извести и улучшение его размалываемости.

В соответствии с теорией обжига клинкера, предложенной В.Н. Юнгом, вращающуюся печь для обжига клинкера по мокрому способу в зависимости от характера процессов на различных ее участках и соответственно от температуры, можно условно разделить на шесть зон: I – зону испарения или сушки; II – подогрева и дегидра-

тации; III – декарбонизации; IV – экзотермических реакций; V – спекания; VI – охлаждения.

Подготовительные зоны – *испарения* и *подогрева* составляют 50-60% длины печи. Здесь при температуре до 200°C шлам высушивается и превращается в комья, которые распадаются на более мягкие гранулы. В зоне подогрева при 450-600°C из глины удаляется кристаллохимически связанная вода, что приводит к образованию аморфизованных дегидратированных глинистых минералов, имеющих повышенную активность.

Следующая зона – *декарбонизации* или *кальцинации* занимает 20-23% длины печи. Температурная область в этой зоне – 850-1100°C. При таких температурах интенсивно идет реакция диссоциации  $\text{CaCO}_3$ , образуется свободный  $\text{CaO}$ , протекают твердофазовые реакции. Наряду с промежуточными соединениями начинают появляться клинкерные минералы  $\beta\text{-2CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  и др.

Учитывая большое поглощение тепла при реакции разложения  $\text{CaCO}_3$ , зона декарбонизации является наиболее напряженной в отношении потребления тепла. В зоне декарбонизации в результате идущих, хотя и медленно, твердофазовых процессов синтеза новых минералов начинают укрупняться пылевидные частички смеси, что в дальнейшем по мере повышения температуры завершится образованием зерен клинкера.

Следующая температурная зона печи – *зона экзотермических реакций* - является одной из самых коротких. Она составляет 5...7% длины печи. В диапазоне температур 1100...1300 °C в этой зоне идут интенсивно твердофазовые экзотермические реакции образования  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Основная зона вращающейся печи – *зона спекания* находится в температурном интервале 1300...1450°C и занимает 10...15% длины печи. Материал в этой зоне частично расплавляется и в зависимости от состава в расплав переходит 15-35% массы смеси. В жидкой фазе происходит образование основного клинкерного минерала – трехкальциевого силиката –  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ) и на его основе алитовой фазы. Содержание свободного  $\text{CaO}$  уменьшается до 0,5-1%. В зоне спекания завершается образование клинкерных гранул из более мелких зерен.

Последняя зона печи – зона *охлаждения* составляет 2-4% ее длины.

Клинкер выходит из печи с температурой 1000-1100 °С и поступает в холодильник.

При обжиге сухих сырьевых смесей используют печи с запечными теплообменниками, в которых используется теплота отходящих газов для прохождения подготовительных процессов. Это позволяет существенно уменьшить длину печей без изменения их производительности.

Наиболее распространенными тепловыми агрегатами для обжига клинкера при сухом способе являются *печи с циклонными теплообменниками*. Агрегаты такого типа состоят из вращающихся печей размером 4×60; 5×75; 6,4×95 м и системы запечных циклонных теплообменников (рис. 10.15).

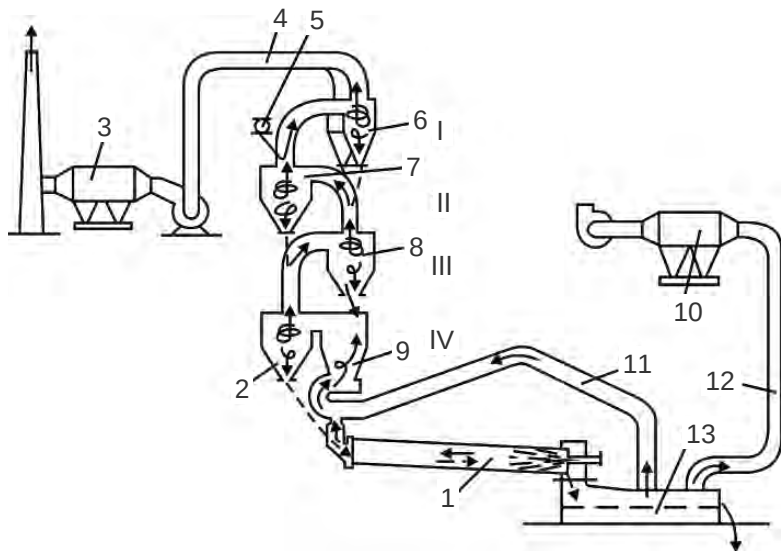


**Рис. 10.15.** Схема печного агрегата для обжига клинкера с циклонными теплообменниками и кальцинатором:

- 1 – вращающаяся печь; 2, 6, 7, 8 – циклоны I-IV ступеней; 3 – электрофильтр; 4 – отходящие газы; 5 – подача сырьевой смеси;
- 9 – кальцинатор (декарбонизатор); 10 – электрофильтр; 11 – вторичный воздух из холодильника; 12 – воздух из холодильника;
- 13 – холодильник клинкера

Основными агрегатами для помола клинкера являются трубные шаровые мельницы, имеющие отношение длины к диаметру в пределах 3-5.

На действующих предприятиях для помола цемента применяют трубные шаровые мельницы, работающие в открытом (рис. 10.16) и замкнутом (рис. 10.17) цикле. Выбор схемы помола, типа и размеров цементных мельниц зависит от объема производства и заданного ас-

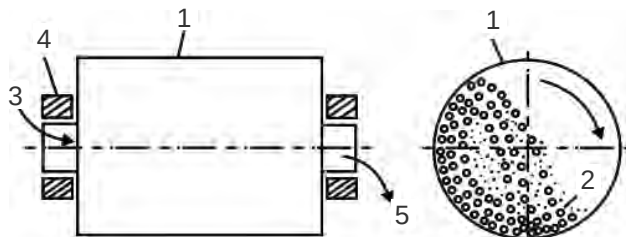


**Рис. 10.16.** Схема шаровой мельницы:  
1 – барабан; 2 – дробящие тела (шары);  
3 – загрузка исходного материала;  
4 – подшипники; 5 – разгрузка  
измельченного материала

сортимента видов цемента. При производстве рядовых цементов на большинстве действующих предприятий применяют помол в открытом цикле, оправданный при получении цементов с удельной поверхностью до 300

м<sup>2</sup>/кг. При производстве высокопрочных и быстротвердеющих цементов рационально применять схемы помола по замкнутому циклу. При этом высокая удельная поверхность цемента обеспечивается при более высокой производительности мельниц и меньшем удельном расходе электроэнергии.

Сущность помола в замкнутом цикле заключается (рис. 10.17) в том, что с помощью сепаратора цемент разделяется на две фракции: одна более тонкая направляется на склад готовой продукции, а более крупная (крупка) идет на домол. Цемент, полученный тонким помолом клинкера и других компонентов, поступает с помощью пневмотранспорта в силосный склад, из которого отгружается в специализированных вагонах или автоцементовозах, а также упакованным в многослойных бумажных мешках.

**Состав цемента.** Свойства портландцемента зависят от его состава. Главным компонентом цемента является клинкер, и состав цемента определяется, прежде всего, химико-минералогическим составом клинкера.

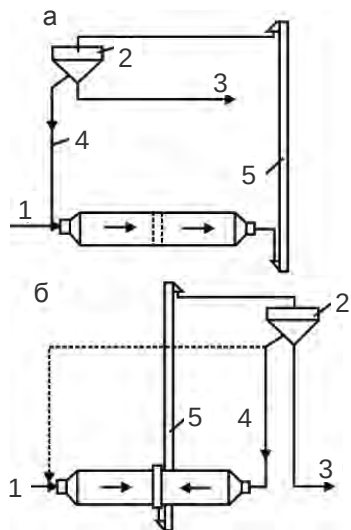


**Рис. 10.17.** Основные схемы помола цемента по замкнутому циклу:

а – с выгрузкой материала в конце мельницы и возвратом крупки в первую камеру; б – с выгрузкой материала из середины и загрузкой крупки в камеру тонкого помола; 1 – исходный продукт; 2 – центробежный сепаратор; 3 – цемент; 4 – крупка из сепараторов; 5 – ковшовый элеватор

При обжиге сырьевых смесей в результате ряда химических реакций образуется комплекс минералов, составляющих клинкер и выделяемых в виде образований различной формы, размера и структуры. Важнейшими минералами портландцементного клинкера являются:

- *трехкальциевый силикат* –  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ );
- *двухкальциевый силикат* –  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ );
- *трехкальциевый алюминат* –  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ );
- *четырекальциевый алюмоферрит* –  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_4\text{AF}$ ).

Образующиеся минералы способны растворять в своих кристаллических решетках различные виды и количества примесных оксидов. Твердые растворы клинкерных минералов являются основными его составляющими или фазами. Впервые в 1883г Ле Шателье, исследуя под микроскопом прозрачные шлифы клинкера, установил наличие в них четырех основных фаз, а затем в 1897 г. Тернебом подтвердил эти наблюдения и дал названия этим фазам. Основные из них, составляющие до 75% массы клинкера, были названы алитом и белитом. *Алит* – наиболее значительный компонент клинкера – представляет собой, как впервые описал Тернебом, бесцветные кристаллы прямоугольной или гексагональной формы (рис. 10.18). *Белит* в клинкере находится в виде округлых зерен темного цвета (рис. 10.19).

В настоящее время экспериментально установлено, что в зависимости от условий образования клинкерные минералы могут иметь самую различную форму.

Исследования, выполненные с помощью микроскопических и рентгеновских методов, показали, что алитовая и белитовая фазы являются твердыми растворами соответственно трехкальциевого и двухкальциевого силикатов, модифицированных небольшим количеством примесных ионов магния, алюминия, натрия, калия и др.



**Рис. 10.18.** Кристаллы алита в клинкере. Ув. 315

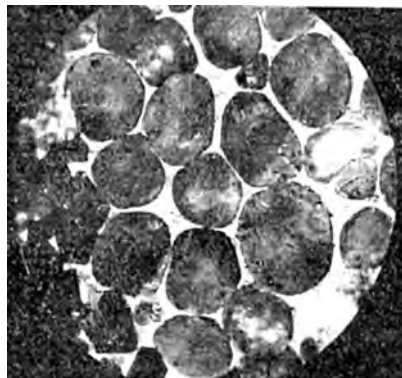


**Рис. 10.19.** Кристаллы белита в клинкере. Ув. 440

Кроме алита и белита клинкер содержит так называемую *промежуточную фазу*, которая состоит из твердых растворов на основе  $C_3A$  и *алюмоферритную фазу* – твердые растворы алюмоферритов переменного состава для большинства клинкеров близкие к  $C_4AF$ . Кроме четырех основных фаз, в клинкере содержатся некоторые второстепенные фазы - клинкерное стекло, свободный оксид кальция, оксид магния (периклаз), щелочные соединения и сульфаты.

Содержание основных фаз в клинкере принято указывать в пересчете на основные образующие их минералы. Оно находится в пределах, %:  $C_3S$  – 50-65;  $C_3A$  – 5-12;  $C_2S$  – 15-25;  $C_4AF$  – 10-20. Иногда, например, для некоторых специальных видов цемента минералогический состав может не укладываться в указанные пределы. Содержание стекла в нормально охлажденном клинкере составляет 6-12%, оксида магния – до 5%, свободного  $CaO$  – до 1%.

Фазовый (химико-минералогический) состав клинкера является одним из главных факторов, влияющих на свойства цемента. Основным носителем вяжущих свойств портландцемента является алит. С повышением его содержания ускоряется твердение цемента и по-

## 10. Минеральные вяжущие вещества

вышается его механическая прочность (рис. 10.20). Некоторые примеси, входящие в алит, увеличивают его гидравлическую активность по сравнению с чистым  $C_3S$  ( $Cr_2O_3$ ,  $Mn_2O_3$ ,  $P_2O_5$  и др.), некоторые ( $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$  и др.) – уменьшают. При этом влияние примесей сказывается преимущественно в начальные сроки твердения.

Белит твердеет очень медленно. Его гидравлическая активность колеблется в широких пределах в зависимости от содержания в кристаллах примесных ионов. Присутствие примесных компонентов сырья приводит к стабилизации в клинкере активной  $\beta$ -формы  $C_2S$ . Двухкальциевый силикат имеет несколько полиморфных модификаций, устойчивых при различных температурах. При переходе  $\beta$ -формы в более низкотемпературную и неактивную  $\gamma$ -форму возможно саморассыпание  $C_2S$ , связанное с существенной перестройкой структуры и увеличением объема примерно на 10%.

Трехкальциевый алюминат  $C_3A$  по сравнению с другими клинкерными минералами твердеет наиболее быстро, существенно ускоряя

твердение цемента в раннем возрасте и не вызывая увеличения конечной прочности. Повышение содержания алюмоферритной фазы, наоборот, несколько снижает прочность в первые сроки твердения, обеспечивая в дальнейшем длительное нарастание прочности цемента.

*Клинкерное стекло* представляет собой не успевшую закристаллизоваться жидкую фазу клин-

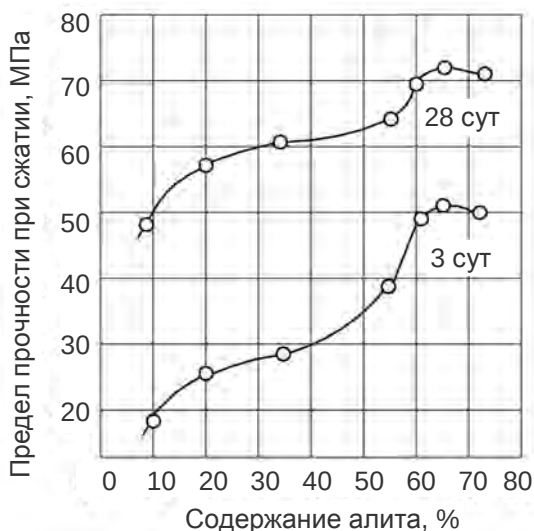


**Рис. 10.20.** Влияние содержания алита на прочность цемента



кера и состоит преимущественно из оксидов кальция, алюминия и железа. Активность стекловидной фазы зависит от ее состава и повышается с увеличением содержания в ней  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Содержание свободного оксида кальция в клинкере должно быть не более 0,5-1%, при большем количестве оно вызывает неравномерность объема и трещинообразование в затвердевшем цементном камне, бетонах и растворах. Аналогично может влиять на свойства цемента и  $\text{MgO}$ , кристаллизующийся в клинкере в виде спекшегося минерала периклаза. Содержание  $\text{MgO}$  допускается в клинкере до 5%. Положительно сказывается перевод части  $\text{MgO}$  в твердые растворы, образуемые клинкерными минералами, а также в стекловидную фазу.

Щелочные соединения содержатся в клинкере в количестве 0,5-1% в пересчете на  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ . Щелочи понижают прочность, могут вызывать ложное схватывание цемента и образование высолов на поверхности растворов и бетонов. Кроме того, при использовании в бетонах заполнителей, содержащих аморфный кремнезем, реакция их со щелочами цемента может вызвать опасные деформации и образование трещин.

Наряду с фазовым составом клинкера свойства цемента в значительной мере определяются его *микроструктурой*, различимой под оптическим и электронным микроскопами. Все многообразие структур клинкера можно свести к двум основным видам: неравномернозернистой (*гломеробластической*) и равномернозернистой (*монадобластической*) (рис. 10.21, 10.22). Клинкеры первого типа (рис. 10.22) характеризуются распределением основных клинкерных минералов - алита и белита в виде различных по величине чередующихся друг с другом групповых скоплений. Равномернозернистая структура (рис. 10.21) характеризуется равномерным распределением одиночных кристаллов клинкерных минералов. В этом случае не наблюдается агрегатов и скоплений кристаллов.

На структуру клинкера, форму кристаллов, их размеры и характер распределения влияют вид сырьевых материалов, размер зерен сырьевой шихты, количество и состав жидкой фазы, образующейся при частичном плавлении сырьевой смеси в процессе обжига, технология производства.

Кроме клинкера в состав портландцемента входит *двуводный гипс* (0,5-3,5% по  $\text{SO}_3$ ) вводимый с гипсовым камнем при помоле.

## 10. Минеральные вяжущие вещества

Основное назначение гипса – регулирование сроков схватывания цемента. Без введения добавки гипса портландцемент схватывается практически мгновенно, что делает невозможным использование его для производства бетона и раствора.

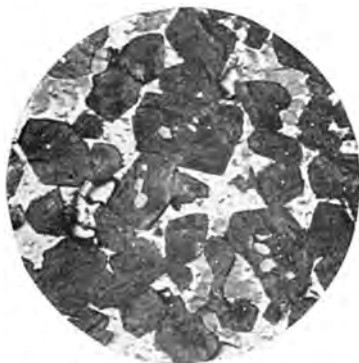


**Рис. 10.21.** Алитовый клинкер  
равномернозернистой  
структуры. Ув.210



**Рис. 10.22.** Алитовый клинкер  
неравномернозернистой  
структуры. Ув.210

В зависимости от вида цемента в его состав для экономии наиболее энергоемкого и дорогостоящего компонента – клинкера, а также целенаправленного изменения ряда свойств при помоле вводят в определенном количестве (в портландцемент до 35%, в шлакопортландцемент – до 80%) доменный гранулированный шлак или другие минеральные добавки. Определяющее значение имеют *активные минеральные добавки*, способные при твердении цемента химически взаимодействовать с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , выделяемым в процессе гидролиза алита и других клинкерных минералов.

Важнейшее значение имеют также добавки – *модификаторы*, вводимые обычно в количестве менее 1%, и существенно влияющие на свойства цемента: интенсификаторы помола, пластификаторы, ускорители твердения и др.

**Процессы твердения.** *Твердение цемента* – переход пластичного цементного теста в искусственный цементный камень – является результатом комплекса сложных химических и физико-химических процессов. Они начинаются уже в первые минуты после затворения цемента водой и продолжаются практически в течение всего периода эксплуатации бетонов и растворов в изделиях и конструкциях.

При этом в период эксплуатации материалов на основе цемента наряду с процессами твердения, позитивно влияющими на строительно-технические свойства бетонов и растворов, возможно развитие деструктивных процессов в материалах под воздействием агрессивных факторов окружающей среды.

Первые работы, посвященные процессам твердения портландцемента были выполнены в конце XIX ст, когда он начинает занимать лидирующие позиции среди совокупности вяжущих материалов, применяемых в строительстве.

К химическим процессам при твердении цемента можно отнести процессы гидратации, гидролиза и обменного взаимодействия, протекающие при затворении цемента водой. Вода в процессе взаимодействия с цементом насыщается переходящими в раствор гидроксидом кальция, являющимся продуктом гидролиза клинкерных минералов (рис. 10.23), гипсом и щелочами, содержащимися в цементе. Наличие и концентрация этих веществ в жидкой фазе твердеющего цемента существенно влияют на состав гидратных новообразований.

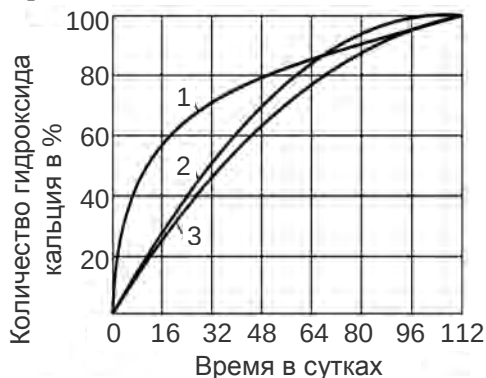


**Рис. 10.23.** Скорость образования  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при гидратации силикатов кальция: 1 –  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ; 2 –  $\beta$ - $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ; 3 –  $\gamma$ - $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$

Основные клинкерные минералы-силикаты при взаимодействии с водой образуют гидросиликаты кальция — слабозакристаллизованные соединения, имеющие переменный состав.

Состав и структура гидросиликатной фазы, образующейся в пространстве, первоначально занятом цементным зерном и водой, различны во внешних и внутренних частях зерна. Уже через

одни сутки твердения цементного камня в электронном микроскопе можно видеть кристаллы гидросиликата кальция, расположенные на поверхности основного минерала цемента — алита ( $\text{C}_3\text{S}$ ). Вырастая, эти кристаллы постепенно перекрывают поровое пространство.

Известно большое число гидросиликатов кальция. Часть из них образует природные минералы (тоберморит, гиллебрандит, ксонотлит), большинство синтезируется искусственно. Из известных классификаций гидросиликатов (Т. Торвальдсона, Х. Тейлора, Р. Богга) более распространена классификация, предложенная Р. Боггом. В соответствии с ней к наиболее распространенным гидросиликатам относятся минералы, состав и условное обозначение которых приведены ниже.

| Состав гидросиликатов                                                             | Обозначения по Боггу     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 1,1\text{H}_2\text{O}$                       | CSH(A)                   |
| $(0,3-0,5)\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (0,5 \dots 2,5)\text{H}_2\text{O}$  | CSH(B)                   |
| $(1,7-2)\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (2 \dots 4)\text{H}_2\text{O}$        | $\text{C}_2\text{SH}_2$  |
| $(1,8-2,4)\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (1 \dots 1,25)\text{H}_2\text{O}$   | $\text{C}_2\text{SH(A)}$ |
| $(1,8-2,4)\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (1 \dots 1,5)\text{H}_2\text{O}$    | $\text{C}_2\text{SH(B)}$ |
| $(1,5-2,25)\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (0,3 \dots 0,4)\text{H}_2\text{O}$ | $\text{C}_2\text{SH(C)}$ |

По сравнению с трехкальциевым силикатом гидратация  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  происходит медленно в особенности в начальный период твердения. По данным Ю.М. Бутта и В.В. Тимашева степень гидратации  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  составляет через 1 сут. – 5-10%, 28 сут. – 30-50%, тогда как для  $\text{C}_3\text{S}$  через 1 сут. – 25-35%, 28 сут. – 78-80%.



**Рис. 10.24.** Образование кристаллов этtringита в гидратирующей цементной системе

Высокой гидратационной активностью характеризуются алюминаты кальция. Первичными продуктами гидратации алюминатной фазы цемента являются преимущественно гексагональные гидроалюминаты кальция типа  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_4\text{AH}_{14}$ ), которые переходят в кубический гидроалюминат  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_3\text{AH}_6$ ). Условием стабильного существования  $\text{C}_4\text{AH}_{14}$  является пересыщение жидкой фазы ионами  $\text{Ca}^{2+}$ .

Гипс, вводимый в цемент для регулирования сроков схватывания и повышения активности силикатов, образует в зависимости от концентрации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в жидкой фазе гидросульфоалюминаты трех- или моносulfатной формы. Кристаллы гидросульфоалюмината трехsulfатной формы ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ) – *эттрингита* (рис. 10.24) имеют игольчатую или призматическую форму и образуются вблизи поверхности зерен  $\text{C}_3\text{A}$  и в межзерновом пространстве. Кристаллы гидросульфоалюмината моносulfатной формы ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) имеют пластинчатую форму, они образуются при пониженных концентрациях  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и сulfата кальция.

Эттрингит неустойчив в водных растворах с содержанием  $\text{CaO}$  меньше 0,027 г/л а также при повышенной температуре.

Железосодержащая фаза цемента гидратируется в нормальных условиях с образованием гексагональных и кубических гидроалюминатов кальция, а также аморфного гидроферрита кальция. После автоклавной обработки алюмоферриты кальция образуют кубический гидроалюминат, гидроксид кальция и оксид железа. Последний является результатом разложения аморфного гидроферрита кальция. Гидроферриты кальция подобно гидроалюминатам образуют комплексные соединения с гипсом.

В состав цементного камня, кроме гидратов – продуктов взаимодействия основных минералов цемента с водой, входят твердые растворы гидроалюминатов и гидроферритов, а также *гидрогранаты* – продукты взаимодействия клинкерного стекла с водой, свободные  $\text{CaO}$  (0,5-%),  $\text{MgO}$  (до 5%), щелочные соединения ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 1\%$ ). Кристаллы гидратных новообразований в цементном камне имеют размеры, как правило, менее 1 мкм и видны лишь при увеличениях, достигаемых электронным микроскопом.

С ростом температуры ускоряется взаимодействие цемента с водой, что характерно для всех химических реакций. Кинетика гидратации минералов портландцементного клинкера и их смесей в портландцементе описывается эмпирическим уравнением:

$$L = k \lg \tau + B, \quad (10.14)$$

где  $L$  – степень гидратации;  $\tau$  – время;  $k$  и  $B$  – константы.

Повышение температуры на  $10^\circ\text{C}$  вызывает увеличение  $k$  в пределах от 10 до 45%.

При понижении температуры степень гидратации цемента существенно уменьшается. Скорость и степень гидратации цемента при отрицательных температурах можно повышать введением химических добавок, понижающих точку заморозания жидкой фазы.

Реакции гидратации цемента характеризуются *тепловыделением*, изменяющимся во времени. Оно зависит от свойств цемента, водоцементного отношения, длительности твердения и температуры (рис. 10.25).

К настоящему времени сложились два противоположных взгляда на механизм гидратации цемента. Часть исследователей придерживаются так называемого *сквозьрастворного механизма*, согласно которому процессу гидратации предшествует растворение безводных соединений. Ряд ученых отдает предпочтение топохимическому или смешанному механизму гидратации. По *топохимическому механизму* молекулы воды или ионы  $H^+$  и  $OH^-$  присоединяются непосредственно к поверхностным слоям кристаллов с образованием первичных гид-

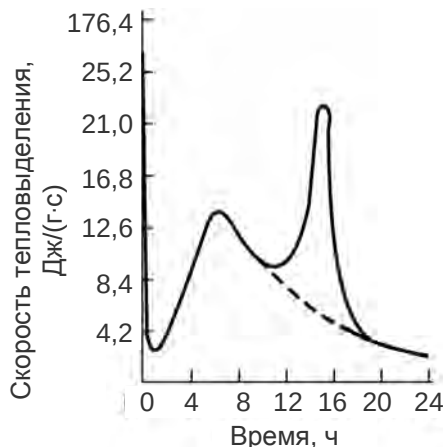


**Рис. 10.25.** Скорость тепловыделения в процессе гидратации цемента

ратированных слоев определенной толщины и последующим переходом гидратированных ионов в раствор. По *смешанному механизму*, в пользу которого свидетельствуют экспериментальные данные, полученные в последние годы, гидратация происходит сначала вследствие растворения, а затем — топохимически.

В соответствии с теорией Ле Шателье (*кристаллизационная теория*) вследствие более высокой растворимости клинкерных минералов по сравнению с образующимися

кристаллогидратами, последние, образуя пересыщенные растворы, выделяются из цементно-водной суспензии и образуют кристаллический сросток.

Основное положение теории Ле Шателье о том, что гидратация цемента происходит через раствор, является исходным в современ-

ных представлениях большинства исследователей на процессы твердения минеральных вяжущих.

По *коллоидной теории* Михаэлиса вода непосредственно взаимодействует с поверхностью цементных минералов, и процессы гидратации идут без их растворения (топохимический механизм). Образующиеся коллоидные системы – *гидрогели*, которые, как считал Михаэлис, имеют переменный состав, обезвоживаются в результате "внутреннего отсасывания" воды, что способствует твердению и образованию цементного камня.

Благодаря совершенствованию методов исследований и особенно привлечению рентгенографического и электронномикроскопического методов анализа, в настоящее время доказана кристаллическая (субмикрорекристаллическая) природа гидратов, в том числе и коллоидной дисперсности.

Обе теории попытался объединить в 1923 г. А.А. Байков (*объединенная коллоидно-химическая теория*). Он выделил при твердении цемента три периода: подготовительный или период растворения (до начала схватывания); коллоидацию (стадия гидратации) и период кристаллизации с образованием кристаллического сростка. Главное положение теории Байкова, актуальное для развития современных теоретических представлений, состоит в возможности значительной части вяжущего гидратироваться по топохимической схеме.

Большой вклад в развитие современных представлений о твердении цементов сделан научной школой П.А. Ребиндера.

С позиций физико-химической механики П.А. Ребиндер разделяет процесс твердения на три стадии:

а) растворение в воде неустойчивых клинкерных фаз и выделение кристаллов;

б) образование *коагуляционной структуры* – рыхлой пространственной сетки;

в) рост и срастание кристаллов.

Первичная или коагуляционная структура возникает на первой стадии формирования и развития дисперсной системы "цемент-вода" за счет энергии межмолекулярного притяжения при повышении концентрации гидратных новообразований. Учитывая, что размер микрокристаллов гидратов меньше 0,1 мкм, между ними возни-

кают коагуляционные контакты, особенностью которых является наличие между частицами тонкой прослойки воды.

По мере развития процессов гидратации, увеличения концентрации гидратных новообразований, уменьшения и полного исчезновения прослоек воды между контактирующими частицами возникает пространственный каркас *конденсационно-кристаллизационной структуры*. Такая структура не обладает тиксотропностью, для нее характерны контакты срастания кристаллов соответствующих гидратов, которые под влиянием напряжений деформируются и необратимо разрушаются.

В соответствии с представлениями, развитыми П.А. Ребиндером, из пересыщенного раствора новообразования кристаллизуются в два этапа. В течение первого происходит формирование каркаса с возникновением контактов срастания между кристаллами новообразований. При этом возможен также рост срастающихся между собой кристаллов. В течение второго этапа новые контакты не возникают, а происходит только обрастание уже имеющегося каркаса и рост составляющих его кристаллов. Решающую роль играет пересыщение раствора. При малом пересыщении количество кристаллов

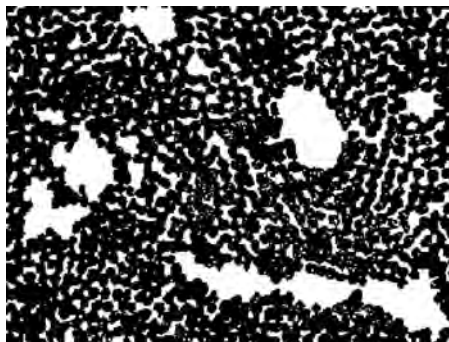


**Рис. 10.26.** Упрощенная модель структуры цементного камня

невелико, они не срастаются. Для наибольшей прочности искусственного камня необходимы оптимальные условия гидратации, обеспечивающие возникновение кристаллов новообразований достаточной величины.

Наряду с гидратными новообразованиями цементный камень включает непрореагировавшую часть зерен цемента, содержание которых с те-

чением времени уменьшается. Так, зерна цемента размером до 5 мкм почти полностью гидратируются в течение 1-3 сут., а до 10 мкм – через месяц.

Цементный камень пронизан порами размером от 0,1 до 100 нм (рис. 10.26).



Существует ряд классификаций пор цементного камня в зависимости от размера и происхождения. В зависимости от размера поры в цементном камне принято обычно делить на три группы: *микропоры* (меньше 2 нм), *мезопоры* (2-50 нм) и *макропоры* (больше 50 нм). С учетом происхождения поры могут быть классифицированы на следующие группы: *поры геля* – 0,5-30 нм, *капиллярные* и *контракционные* – 30-50 мкм, *микровоздушные* – 0,1-1 мм, *поры недоуплотнения* – более 1 мм.

Распределение пор в цементном камне зависит также от температурно-влажностных условий твердения цемента, его минерального состава, длительности твердения.

Значительно изменяется поровая структура цементного камня при тепловлажностной обработке. При пропаривании не только увеличивается общая пористость, но и объем макропор при одновременном уменьшении объема микро- и переходных пор.

Пористость цементного камня может быть приближенно оценена по количеству испаряемой воды. Общий объем пор в цементном камне, отнесенный к 1 г цемента ( $\Pi_{ц,к}$ ), описывается уравнением:

$$\Pi_{ц,к} = V / \zeta - 0,23\alpha, \quad (10.15)$$

где  $\alpha$  – часть прогидратированного цемента или *степень его гидратации*. Формула получена из предположения, обоснованного эмпирически, что при полной гидратации 1 г цемента химически связывает приблизительно 0,23 г воды.

Характер изменения различных видов пористости цементного камня с увеличением длительности твердения и степени гидратации приведен на рис. 10.27.

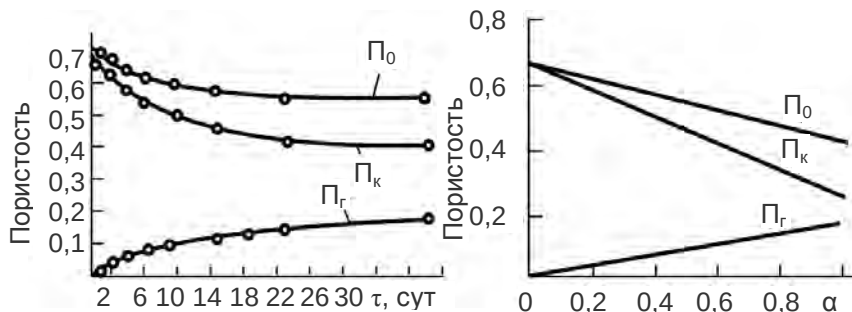


**Рис. 10.27.** Зависимость общей ( $\Pi_0$ ), капиллярной ( $\Pi_k$ ) и гелевой ( $\Pi_r$ ) пористости цементного камня ( $V/\zeta=0,7$ ) от: а – времени твердения; б – степени гидратации цемента

**Свойства портландцемента.** Свойства цемента как порошкообразного продукта характеризуются плотностью, показателями дисперсности или тонкости измельчения, гигроскопичностью.

*Плотность* (истинная плотность) портландцемента характеризует его массу в единице объема без учета пор и пустот, т.е. в абсолютно плотном состоянии. Она колеблется в диапазоне 3,1-3,2 г/см<sup>3</sup>. На плотность цемента существенное влияние оказывает содержание алюмоферритной фазы (плотность  $C_4AF=3,77$  г/см<sup>3</sup>). Ее можно увеличивать, вводя в состав цементного клинкера оксиды тяжелых металлов, например, бария. Уменьшают плотность портландцемента активные минеральные добавки. Для пуццолановых и шлаковых портландцементов, содержащих повышенное количество минеральных добавок, плотность находится в диапазоне 2,7-2,9 г/см<sup>3</sup>.

Показатель плотности портландцемента используют в различных технологических расчетах, например, при определении составов бетонных смесей. С уменьшением плотности увеличивается объем, занимаемый портландцементом при постоянной массе. Это позволяет получать более пластичные бетонные и растворные смеси.

При тампонировании нефтяных и газовых скважин, а также при цементационных работах могут применяться утяжеленные цементы с повышенной плотностью (до 3,5-3,8 г/см<sup>3</sup>). Такие цементы используют также при изготовлении бетонов и растворов для защиты от ионизирующих излучений.

*Насыпная плотность* портландцемента учитывает объем межзерновых пустот. Для портландцемента в рыхлом состоянии она колеблется в пределах 900...1100 кг/м<sup>3</sup>, уплотненном – 1400-1700 кг/м<sup>3</sup>. Насыпная плотность существенно снижается при увеличении тонкости помола цемента. Показатель насыпной плотности используется при расчете емкости складских помещений, бункеров и силосных банок для хранения цемента, учитывается при выборе транспортных средств для его перевозки и др. Для учета массы цементов при хранении в силосах принимается обычно насыпная плотность для портландцемента 1450 и шлакопортландцемента 1250 кг/м<sup>3</sup>.

*Тонкость помола* цемента – важнейший показатель его качества, с которым связано большинство других строительно-технических свойств. Тонкость помола устанавливают ситовым анализом, опре-

делением удельной поверхности и зернового (гранулометрического) состава.

Основным стандартным показателем, характеризующим тонкость помола цемента, является остаток на сите № 008. Он характеризует содержание в портландцементе фракции более 80 мкм. Этот показатель не должен быть более 15%. В настоящее время на заводах даже рядовые цементы измельчают обычно до остатка на сите № 008 не более 5-8%, а быстротвердеющие и высокопрочные – 2-4% и меньше. Остаток на сите № 008 не характеризует содержание в цементе наиболее активных зерен, влияющих на его активность (менее 40 мкм). Более объективным показателем тонкости измельчения цемента, отражающим общее содержание в нем зерен, принимающих активное участие в процессах гидратации и твердения, является величина его *удельной поверхности*, характеризующая суммарную поверхность зерен в единице массы или объема. Этот показатель, определенный методом измерения сопротивления прохождению воздуха через слой цементного порошка (по Блейну), для рядовых портландцементов находится в пределах 280-250 м<sup>2</sup>/кг и достигает 400-450 м<sup>2</sup>/кг для быстротвердеющих и высокопрочных цементов. При необходимости наиболее полной характеристики тонкости помола цемента, кроме измерения удельной поверхности, определяют содержание в нем различных по размерам фракций зерен, например с помощью седиментационного анализа.

Зерна фракции 0-3 мкм обеспечивают высокую прочность цемента в односуточном возрасте, но в последующем рост прочности останавливается. Зерна крупнее 30 мкм обеспечивают прирост и сохранение прочности цементного камня в течение многих лет. Зерна крупнее 40-60 мкм обычно полностью не гидратируются и выполняют в цементном камне, в основном, роль *микронаполнителей*, что позволило В.Н. Юнгу назвать цементный камень микробетоном. Регулирование зернового состава цемента достигается при его измельчении в мельницах замкнутого цикла при регулировании режима работы сепараторов.

Зерновой состав цемента определяет его удельную поверхность, с увеличением размеров частиц она резко уменьшается. Максимальная величина удельной поверхности, превышение которой не приводит практически к увеличению прочности цементного камня,

## 10. Минеральные вяжущие вещества

составляет 550-600 м<sup>2</sup>/кг. С увеличением удельной поверхности резко возрастает расход электроэнергии на помол цемента (рис. 10.28).

Слишком тонкий помол может вызвать и другие нежелательные результаты: возрастают водопотребность и усадочные деформации цементного камня, возможно падение прочности, вследствие перекристаллизации гидратных новообразований.

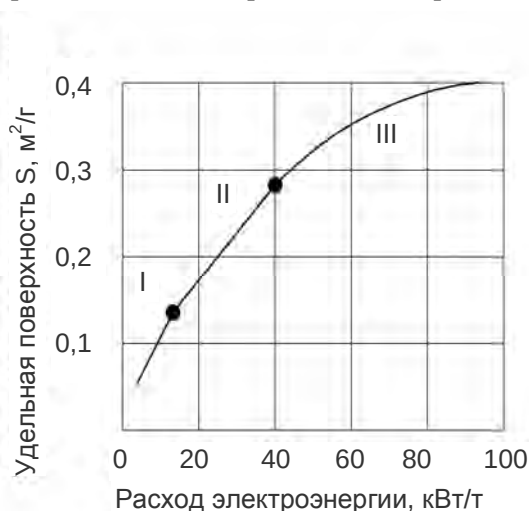


**Рис. 10.28.** Расход электроэнергии на помол цементного клинкера:  
I, II, III – этапы помола

Важным свойством цемента, определяющим его сохранность, изменение активности при длительном хранении является *гигроскопичность*. Под гигроскопичностью понимают свойство капиллярно-пористых материалов поглощать водяной пар из воздуха. На динамику гигроскопического поглощения влаги влияют относительная влажность и температура воздуха и цемента, удельная поверхность

цемента и его химико-минералогический состав и др. Снижают гигроскопичность цемента добавки ПВА особенно гидрофобизирующего типа (рис. 10.29).

Из свойств цементного теста, в значительной мере характеризующих качество цемента и подлежащих обязательному испытанию для каждой партии, можно выделить его водопотребность и сроки схватывания.

*Водопотребность* цемента условно характеризуют *нормальной густотой*, т.е. количеством воды в процентах от массы цемента, необходимой для придания цементному тесту определенной стандартной консистенции. Такая консистенция характеризуется определенным погружением в цементное тесто пестика прибора Вика.

Он не должен доходить на 5-7 мм до пластинки, на которой установлено заполненное тестом кольцо. Нормальная густота портландцемента находится в пределах 24-28%. Она увеличивается с увеличением в цементе содержания алюминатов, влагоемких минеральных добавок осадочного происхождения, таких как опока, трепел, диатомит и др. Пуццолановые портландцементы содержащие

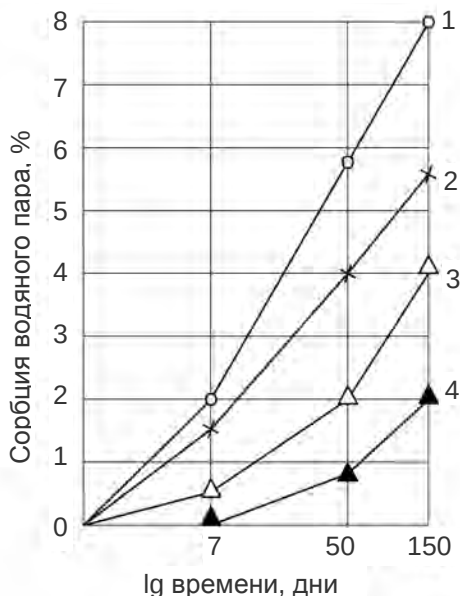


**Рис. 10.29.** Общий характер кинетики сорбции водяного пара при нахождении цемента во влажной среде ( $W = 75\%$ ): 1 – цемент без добавок; 2 – добавка ЛСТ 0,15%; 3 – ЛСТ 0,15% + асидол 0,05%; 4 – асидол 0,1%

повышенное количество таких добавок, имеют нормальную густоту 30-35%. Несколько увеличивает нормальную густоту цемента повышение его удельной поверхности. Наиболее эффективным технологическим приемом уменьшения нормальной густоты цемента является введение в его состав пластифицирующих ПАВ. Современные добавки *суперпластификаторы* (гиперпластификаторы) позволяют снизить нормальную густоту цемента до 17-18%. При такой нормальной густоте содержание воды с учетом достижимой степени гидратации достаточно лишь для химического связывания цемента.

С увеличением нормальной густоты возрастает количество избыточной воды в цементном тесте и капиллярная пористость цементного камня, с которой тесно связаны прочность, морозостойкость, усадка, коррозионная стойкость бетонов и растворов.

Нормальная густота цемента в совокупности с водопотребностью заполнителей определяет водопотребность бетонных смесей.

При изменении нормальной густоты цемента на 1% расход воды в бетонной смеси (при постоянной удобоукладываемости) увеличивается на 3-5 л. С нормальной густотой цементного теста тесно связана его *водоудерживающая способность*. Она составляет приблизительно  $1,65K_{н.г.}$ , где  $K_{н.г.}$  – нормальная густота цемента в долях единицы. При механических воздействиях, например, встряхиваниях, вибрировании водоудерживающая способность цемента снижается примерно до  $1,35 K_{н.г.}$ . С водоудерживающей способностью цемента связано предельное количество воды, которое может удерживаться бетонной или растворной смесью без существенного водоотделения.

Для структурированных (неньютоновских) жидкостей в т.ч. и для цементного теста характерна *тиксотропия* – способность при механических воздействиях снижать вязкость и восстанавливать ее при прекращении этих воздействий. На способности цементного теста к тиксотропии основана способность бетонных и растворных смесей существенно разжижаться и уплотняться при таких видах механических воздействий как вибрирование.

*Схватывание цементного теста* сопровождается потерей его пластичности и характеризуется способностью выдерживать минимальную нагрузку, измеряемую усилием, создаваемым иглой прибора Вика.

Весь период схватывания условно делится на начало и конец. *Началом схватывания* цементного теста считается время, прошедшее от момента затворения, до того момента, когда игла прибора Вика не будет доходить до пластинки, на которой установлено кольцо на 1-2 мм. *Концом схватывания* считается время от начала затворения до момента, когда игла будет погружаться в тесто не более чем на 1 мм. Начало и конец схватывания цементов нормируются в пределах, удобных для изготовления растворов и бетонов. Начало схватывания должно наступать не ранее чем через 60 мин для цементов марок 300, 400 и 500 и 45 мин марок 550 и 600. Конец схватывания для цемента должен наступать не позднее 10 ч.

Регулирование сроков схватывания обеспечивают за счет введения в портландцемент добавки гипса. Двуводный гипс замедляет схватывание портландцемента. Замедляющее действие гипса связано с образованием на поверхности зерен  $C_3A$  (наиболее быстротвердеющей фазы цемента) защитных оболочек гидросульфаталюми-

ната. Последние исследования показали, что механизм влияния гипса связан с изменением концентрации активных центров на частичках цемента, которая влияет на коагуляционные процессы в цементном тесте.

Скорость схватывания цемента зависит от многих факторов. Она ускоряется с повышением температуры, уменьшением водоцементного отношения, повышением удельной поверхности цемента.

Помол горячего клинкера особенно в мельницах открытого цикла приводит к повышению температуры цемента до 150°C и выше, что вызывает дегидратацию гипса с образованием полугидрата и растворимого ангидрита. Быстрая гидратация этих составляющих цемента может приводить к преждевременному загустеванию цементного теста – *ложному схватыванию*. Ложное схватывание вызывает быструю потерю пластичности бетонной смеси, необходимость увеличения расхода воды, что, в конечном счете, приводит к ухудшению основных свойств бетонов и растворов. Ложному схватыванию цемента также способствует высокое содержание в клинкере свободной извести и щелочей. Для устранения ложного схватывания необходимо обеспечивать охлаждение клинкера перед помолем, а также достаточную аспирацию мельниц и применение замкнутого цикла.

Схватывание цементного теста в значительной степени определяет *период «жизнеспособности»* бетонных и растворных смесей, в течение которого возможно их транспортирование и технологическая обработка. В практике бетонных работ может возникать потребность в дополнительном замедлении схватывания портландцемента, которое обеспечивается введением в растворные или бетонные смеси добавок-замедлителей схватывания. В соответствии с классификацией добавок, предложенной В.Б. Ратиновым и Т.И. Розенбергом, замедлителями схватывания могут быть добавки первого, второго и четвертого классов. Добавки первого класса являются замедлителями в том случае, если они снижают вероятность возникновения при гидратации цемента зародышей новых фаз, второго класса – образуют экранирующие пленки из продуктов их взаимодействия с цементом. При применении добавок четвертого класса – ПАВ в результате адсорбции тормозится растворение зерен, возрастает диффузионное сопротивление процессам гидратации.

Ускорить схватывание портландцемента можно введением добавок – электролитов, а также веществ, являющихся центрами кристаллизации гидратных новообразований.

Процессы твердения цемента сопровождаются объемными изменениями цементного камня. Для кондиционного портландцемента объемные изменения при переходе из пластичного теста в твердое состояние не должны сопровождаться недопустимыми деформациями и образованием трещин. Этим требованием обусловлена обязательность испытания цемента на *равномерность изменения объема*. При стандартных испытаниях цемента равномерность изменения объема оценивают визуально по деформации образцов - лепешек (диаметром 70-80 и толщиной 10 мм) из цементного теста нормальной густоты, подвергнутых кипячению после 24 ч твердения в нормальных влажностных условиях. Основной причиной неравномерного изменения объема цементного камня является гидратация в нем оксидов кальция и магния, оставшихся в свободном состоянии после обжига клинкера. В некоторых случаях такая неравномерность связана с образованием в уже затвердевшем цементе гидросульфоалюмината кальция при повышенной дозе добавки гипса.



**Рис. 10.30.** Цементные образцы, не выдержавшие испытания на равномерность изменения объема

Оксид кальция, оставшийся в цементном клинкере в свободном состоянии после прохождения реакций клинкерообразования, и особенно оксид магния, практически не вступающий при обжиге в химическое взаимодействие с кислотными оксидами, находится в клинкере в спекшемся крупнокристалличе-

ском виде и очень медленно реагируют с водой с образованием гидроксидов кальция и магния в затвердевшем цементном камне и соответствующим увеличением его объема. При содержании  $MgO$  в клинкере более 5% вместо кипячения испытание на равномерность изменения объема образцов-лепешек проводят при автоклавной обработке.

Цемент соответствует требованиям стандарта, если на лицевой стороне образцов – лепешек не обнаружено радиальных, достигающих



до краев трещин или сетки мелких трещин, видимых невооруженным глазом или в лупу (рис. 10.30). Не допускаются также искривления поверхности образцов, превышающие 2 мм. Вместе с тем появление на образцах в первые сутки после испытаний трещин усыхания, не доходящих до краев лепешек, не является признаком неравномерности изменения объема.

Для предотвращения неравномерности изменения объема цемента на заводах стремятся получать клинкер с минимальным содержанием свободных оксидов кальция и магния, а при получении цемента не превышать установленную дозировку гипса.

Твердение цемента и материалов на его основе сопровождается контракционной и влажностной усадкой.

*Контракция* (стяжение) является следствием реакций химического взаимодействия минералов цемента с водой, в результате которых образуются гидраты, абсолютные объемы которых меньше чем суммарные объемы безводных минералов и воды, необходимой для гидратации.

Усадка цементного камня при изменении его влажности происходит в две стадии:

- 1) когда цементное тесто (бетонная смесь) находится в пластичном состоянии (пластическая усадка);
- 2) по мере твердения и высыхания цементного камня, бетонов и растворов.

В наибольшей мере сказывается на поведении растворов и бетонов в конструкциях *влажностная* или *гидравлическая усадка*, характерная по мере высыхания материала. Уменьшение объема в процессе высыхания материала обусловлено прежде всего действием капиллярных сил, возникающих в цементном камне при испарении воды из капилляров.

При прочих равных условиях конечная усадка цементного камня увеличивается с увеличением содержания  $C_2S$ , при гидратации которого образуется примерно на 25% больше тоберморитового геля чем из  $C_3S$ . Повышается также усадка цементного камня с ростом содержания  $C_3A$ , удельной поверхности цемента, содержания щелочей.

Процессы твердения цемента сопровождаются выделением значительного количества тепла. Суммарный тепловой эффект твердения складывается из теплоты смачивания цемента, растворения

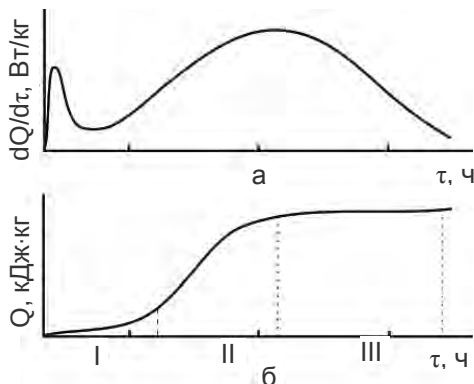


**Рис. 10.31.** Кинетика тепловыделения при твердении цементов (по А.В. Ушерову-Маршаку): а – скорость тепловыделения; б – тепловыделение; I – индукционный; II – ускоренный; III – замедленный периоды гидратации

*Тепловыделение цемента* (кДж/кг) в зависимости от минералогического состава можно ориентировочно рассчитать с помощью аддитивного уравнения (рис. 10.31):

$$q_{\tau} = a_{\tau}C_3S + b_{\tau}C_2S + c_{\tau}C_3A + d_{\tau}C_4AF, \quad (10.16.)$$

где  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  – расчетное содержание соответствующих минералов, %;  $a_{\tau}$ ,  $b_{\tau}$ ,  $c_{\tau}$ ,  $d_{\tau}$  – доли участия минералов в тепловыделении цемента для возраста  $\tau$  суток.

Клинкерные минералы по влиянию на тепловыделение цемента (рис. 10.32) можно расположить в ряд  $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$ .

клинкерных минералов и химических реакций гидратации, теплоты кристаллизации и других фазовых переходов в твердеющем цементном камне, адсорбции воды на продуктах гидратации. Наиболее значительный вклад в общий тепловой эффект твердения цементов и материалов на его основе вносит тепловыделение или экзотермия цемента в результате реакций его гидратации.

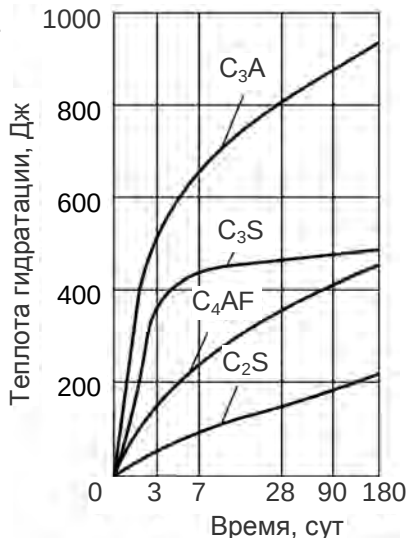


**Рис. 10.32.** Тепловыделение при гидратации клинкерных минералов

Все факторы, ускоряющие процесс гидратации вызывают соответствующее увеличение тепловыделения и наоборот.

Важнейшим качественным показателем цемента в бетонах и растворах является его прочность. Прочностной характеристикой цемента в странах Европейского Союза является *класс прочности*, характеризующий прочность при сжатии в МПа, которую должен иметь цемент в 28-суточном возрасте при доверительной вероятности 95% и испытаниях образцов, изготовленных и твердевших в определенных стандартных условиях. Классы как прочностные характеристики цементов предусмотрены также ГОСТ 31108-2003, введенным в действие в России в 2003 г. Определение класса прочности цемента производится в соответствии с требованиями ГОСТ 30744-2001.

При определении класса прочности цемента образцы-балочки изготавливают размером 40×40×160 мм на стандартном полифракционном песке при водоцементном отношении равном 0,5. Соотношение между цементом и песком принимается 1:3 (по массе).

Классы прочности цемента, нормируемые ГОСТ 31108-2003, произведены в табл. 10.5.

Таблица 10.5

Требования к прочности цементов по ГОСТ 31108-2003

| Класс прочности цемента | Прочность на сжатие, МПа, в возрасте |                 |          |          |
|-------------------------|--------------------------------------|-----------------|----------|----------|
|                         | 2 сут, не менее                      | 7 сут, не менее | 28 сут   |          |
|                         |                                      |                 | не менее | не более |
| 22,5Н                   | -                                    | 11              | 22,5     | 42,5     |
| 32,5Н                   | -                                    | 16              | 32,5     | 52,5     |
| 32,5Б*                  | 10                                   | -               |          |          |
| 42,5Н                   | 10                                   | -               | 42,5     | 62,5     |
| 42,5Б*                  | 20                                   | -               |          |          |
| 52,5Н                   | 20                                   | -               | 52,5     | -        |
| 52,5Б*                  | 30                                   | -               |          |          |

**Примечание.** "Б" – быстротвердеющий.

Введение ГОСТ 31108-2003 не отменило распространенную в России и странах СНГ оценку прочности цемента по показателю *марки* – нормируемой средней величине 28 сут. прочности цемента

## 10. Минеральные вяжущие вещества

на сжатие (в МПа×10). Показатели марки цемента и соответствующие им значения прочности при сжатии и изгибе по ГОСТ 10178-85 приведены в табл. 10.6.

Таблица 10.6

Требования к прочности портландцемента (ПЦ)  
и шлакопортландцемента (ШПЦ) по ГОСТ 10178-85

| Обозначение<br>вида цемента         | Гаранти-<br>рованная<br>марка | Предел прочности, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ) |          |                               |            |
|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|----------|-------------------------------|------------|
|                                     |                               | при изгибе в воз-<br>расте, сут              |          | при сжатии в возрасте,<br>сут |            |
|                                     |                               | 3                                            | 28       | 3                             | 28         |
| ПЦ-Д0*,<br>ПЦ-Д5,<br>ПЦ-Д20,<br>ШПЦ | 300                           | —                                            | 4,4 (45) | —                             | 29,4 (300) |
|                                     | 400                           | —                                            | 5,4 (55) | —                             | 39,2 (400) |
|                                     | 500                           | —                                            | 5,9 (60) | —                             | 49,0 (500) |
|                                     | 550                           | —                                            | 6,1 (62) | —                             | 53,9 (550) |
|                                     | 600                           | —                                            | 6,4 (65) | —                             | 58,8 (600) |
| ПЦ-Д20-Б**                          | 400                           | 3,9 (40)                                     | 5,4 (55) | 24,5 (250)                    | 39,2 (400) |
|                                     | 500                           | 4,4 (45)                                     | 5,9 (60) | 27,5 (280)                    | 49,0 (500) |
| ШПЦ-Б**                             | 400                           | 3,4 (35)                                     | 5,4 (55) | 21,5 (220)                    | 39,2 (400) |

\* ПЦ-Д0, ПЦ-Д5, ПЦ-Д20, - портландцементы соответственно без, с 5% и 20% минеральных добавок; \*\* "Б" – быстротвердеющий.

При отгрузке цемента завод устанавливает гарантированную марку на основе краткосрочных испытаний цемента, а также по данным оперативного технологического контроля (качеству клинкера, виду и количеству добавок, тонкости помола цемента и др). Допустимые отклонения в установленной марке по фактической *активности цемента* – т.е. прочности стандартных образцов при сжатии в 28 сут не должны превышать 5% (в нижнюю сторону).

### 10.6. Разновидности цемента

Цементы применяются для изготовления бетонов, растворов, строительных изделий и конструкций в разнообразных отраслях строительства. Особенности эксплуатационных требований к материалам на основе цемента обусловили необходимость разработки большой совокупности его разновидностей. Часть из них производится серийно цементной промышленностью, часть – по мере возникающей необходимости по специальным техническим условиям.

С развитием технологии цемента и бетона, количество разновидностей цемента с улучшенными и специальными свойствами постоянно увеличивается.

В зависимости от состава и нормируемых свойств все виды портландцементов можно разделить на *цементы общестроительного и специального назначения*. Последние применяют при строительстве транспортных сооружений, гидроэлектростанций, бурении нефтяных и газовых скважин, производстве асбестоцементных изделий, для отделочных работ и др.

Для регулирования свойств цемента в необходимом направлении изменяют химико-минералогический состав цементного клинкера, подбирают вещественный состав цемента, вводя в него минеральные и органические добавки, регулируя зерновой состав и удельную поверхность.

**Портландцементы общестроительного назначения.** Портландцементы общестроительного назначения, изготавливаемые в России и других странах СНГ, стандартизованы в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 31108-2003. Этот стандарт гармонизирован с Европейскими нормами ЕН 197-1 и содержит требования к пяти наиболее широко применяемым в строительстве типам цемента:

- ЦЕМ I – портландцемент (от 0 до 5% добавок, включая вспомогательные компоненты);
- ЦЕМ II – портландцемент с минеральными добавками (от 6 до 20 % минеральных добавок или от 6 до 35% доменного или электротермофосфорного гранулированного шлака);
- ЦЕМ III – шлакопортландцемент (от 36 до 65% доменного или электротермофосфорного гранулированного шлака);
- ЦЕМ IV – пуццолановый цемент (от 21 до 35% минеральных добавок);
- ЦЕМ V – композиционный цемент (цемент с композиционной добавкой: от 11 до 30% минеральных добавок и от 11 до 30% доменного или электротермофосфорного гранулированного шлака).

Общестроительные цементы выпускают классов прочности 22,5; 32,5; 42,5; 52,5. Для цемента всех классов прочности, кроме класса 22,5, введено разделение по скорости твердения на нормальнотвер-

## 10. Минеральные вяжущие вещества

деющие (Н) и быстротвердеющие (Б). Цемент класса 22,5 выпускается лишь нормальнотвердеющим.

Для цементов классов 22,5Н и 32,5Н, кроме 28 суточной прочности на сжатие, нормируется прочность на сжатие в возрасте 7 сут. Для быстротвердеющих цементов всех классов установлены дополнительные нормативы по прочности на сжатие в возрасте двое суток.

Суммарное содержание трехкальциевого и двухкальциевого силикатов ( $C_3S + C_2S$ ) в клинкере должно быть не менее 67% по массе, а массовое отношение оксида кальция ( $CaO$ ) к оксиду кремния ( $SiO_2$ ) – не менее 2.

В качестве минеральных добавок к цементам кроме гранулированного шлака применяют активные минеральные добавки – пуццоланы, топливные золы, микрокремнезем, глиеж и обожженные сланцы, а также добавку известняка как наполнителя с содержанием  $CaCO_3$  не менее 75% и глинистых примесей не более 1%.

В качестве вспомогательных компонентов могут применяться любые минеральные добавки, не увеличивающие существенно водопотребность цемента, не снижающие долговечность бетона и не вызывающие коррозию арматуры.

В цементы всех типов могут быть введены пластифицирующие и гидрофобизирующие поверхностно-активные вещества (ПАВ) в количестве не более 0,3% от массы цемента в пересчете на сухое вещество добавки. Для интенсификации помола цемента разрешается вводить технологические добавки (каменный уголь, ПАВ), не ухудшающие качество цемента, в количестве не более 1%, в том числе органические – не более 0,15%. Ограничение предельного содержания таких добавок в цементе вызвано их, как правило, негативным влиянием на прочность при повышенных дозировках.

Содержание  $MgO$  в клинкере для всех типов цемента должно быть не более 5%. По специальному разрешению при условии обеспечения равномерности изменения объема образцов при их испытании в автоклаве содержание  $MgO$  может быть доведено до 5...6%. Нормируется также содержание в цементах  $SO_3$ , вносимого, в основном, добавкой гипса. Для всех типов портландцемента минимальное содержание  $SO_3$  должно быть не менее 1%, максимальное для цементов I, II, IV и V типов классов 22,5Н, 32,5Н, 32,5Б и 42,5Н – не более

3,5%, классов 42,5Б, 52,5Н, 52,5Б а также всех классов цемента III-го типа – 4%.

Вместе с сырьем в цемент могут попадать хлористые соли. Они оказывают коррозионное действие на арматуру в бетоне, на металлическое оборудование. Содержание хлоридов в цементах допускается не более 0,1% по массе, а в цементе, используемом для изготовления предварительно напряженных железобетонных конструкций, вообще не допускается. Ограничивается в количестве не более 0,6% также содержание щелочных оксидов в пересчете на  $\text{Na}_2\text{O}$  в цементе, предназначенном для изготовления массивных бетонных сооружений с использованием реакционноспособных заполнителей.

Цементы II типа дополнительно подразделяют на подтипы А и Б с содержанием шлака соответственно от 6 до 20 и от 21 до 35%.

В параллельно действующем наряду с ГОСТ 31108-2003 ГОСТ 10178-85 цементы общестроительного назначения подразделяют по вещественному составу на *портландцемент* (без минеральных добавок), *портландцемент с добавками* (с активными минеральными добавками не более 20%), *шлакопортландцемент* (с добавками гранулированного шлака более 20%). По прочности на сжатие портландцемент и портландцемент с добавками подразделяют на марки 400, 500, 550 и 600. *Марка* в отличие от класса характеризует среднюю прочность стандартных образцов цемента на сжатие в 28-суточном возрасте, поэтому численные показатели марок выше, чем соответствующих классов.

Быстротвердеющий портландцемент (БТЦ) по ГОСТ 10178-85 изготавливают марок 400 и 500. Для него наряду с 28-суточной нормируется 3-х суточная прочность (в отличие от ГОСТ 31108-2003 по которому нормируется 2-суточная прочность при сжатии).

При испытании по ГОСТ 310-81 3-х суточная прочность для быстротвердеющих цементов должна быть не менее 50...55% 28-суточной.

К *высокопрочным* (ВПЦ) относят цементы с активностью в 28-суточном возрасте 55-60 МПа и более.

Первые опытные партии быстротвердеющего цемента были разработаны под руководством В.Н. Юнга и С.М. Рояка и выпущены в 30-х годах прошлого столетия. Промышленное производство быстротвердеющего цемента было организовано в 1955 г. Эффективность применения быстротвердеющих и высокопрочных цементов в

строительстве и строительной индустрии обусловлена возможностью уменьшения материалоемкости железобетонных изделий и конструкций, сокращения технологического цикла их изготовления, монтажа и установки под рабочую нагрузку и, наконец, повышения несущей способности и надежности конструкций, зданий и сооружений.

Важнейшим следствием применения БТЦ и ВПЦ является сокращение цикла тепловой обработки и температуры пропаривания, а в ряде случаев и переход на беспропарочную технологию изготовления изделий. На основе высокопрочных цементов возможно изготовление высокопрочных бетонов, позволяющих уменьшить массу конструкций и расход арматуры, перейти на большепролетные тонкостенные конструкции.

К настоящему времени разработано четыре основных направлений получения БТЦ и ВПЦ:

1. Последовательная оптимизация всех переделов производства цемента при строгой регламентации технологических параметров.
2. Модифицирование состава клинкерных минералов, их легирование путем введения в сырьевую смесь специальных добавок.
3. Введение в цемент специальных кристаллизационных затравок.
4. Синтез смешанных цементов, каждый из компонентов которых упрочняет элементы структуры гидратационного твердения остальных компонентов.

Для получения БТЦ и ВПЦ в соответствии с первым направлением большое значение имеют тонкий помол и высокая однородность сырьевой смеси, сильный и равномерный обжиг клинкера, правильный подбор вида и зольности топлива, резкое охлаждение клинкера. Важное значение для активности клинкера имеет также его микрокристаллическая структура. Цемент лучшего качества получается преимущественно при отчетливой правильной кристаллизации алита, характерной для т.н. монадобластической структуры, формирующейся при оптимальных условиях обжига.

Быстротвердеющие и высокопрочные портландцементы характеризуются высоким содержанием частиц крупностью до 30 мкм. при этом для достижения высокой ранней прочности необходимо преобладание частиц цемента (рис. 10.33)



К настоящему времени в ряде стран разработаны *сверхбыстротвердеющие цементы* позволяющие уже через 2-6 ч после затворения достигать прочность при сжатии 5-20 МПа а в 28 сут. – 70-80 МПа и более.

К таким цементам можно отнести фторсодержащий портландцемент. Перспективным способом получения сверхбыстротвердеющих цементов является также введение в состав сырьевых смесей сульфатов кальция в количестве около 10%. Образующиеся при обжиге

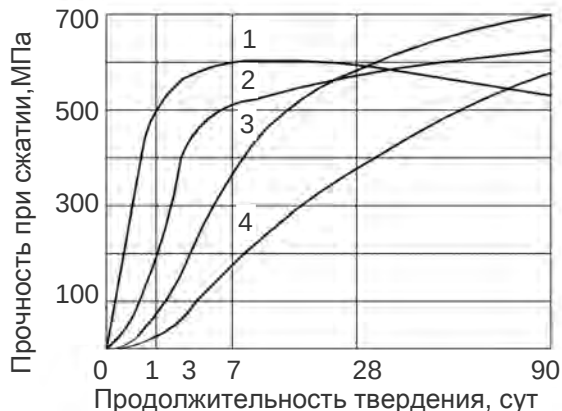


**Рис. 10.33.** Кинетика твердения цементного камня при применении цемента с различными размерами зерен: 1 – <3 мкм; 2 – 3-9 мкм; 3 – 9-25 мкм; 4 – 25-50 мкм

сульфоалюминаты кальция придают цементу способность к быстрому твердению, высокую гидравлическую активность. Сырьевым компонентом для производства клинкера такого цемента могут быть фосфогипс и другие промышленные отходы.

*Пластифицированный и гидро-*

*фобный* цементы получают при введении в процессе помола цемента добавок соответственно гидрофилизующих и гидрофобизующих ПАВ. Гидрофилизующие ПАВ поглощаются на поверхности зерен цемента и образуют гидрофильные пленки, способствующие лучшему смачиванию частиц водой, уменьшению их сцепления и повышению пластичности цементного теста. Из гидрофилизующих ПАВ широко применяют технические лигносульфонаты (ЛСТ) обычно в количестве 0,15-0,35% массы цемента (рис. 10.34).

Гидрофилизующие ПАВ поглощаются на поверхности зерен цемента и образуют гидрофильные пленки, способствующие лучшему смачиванию частиц водой, уменьшению их сцепления и повышению пластичности цементного теста.

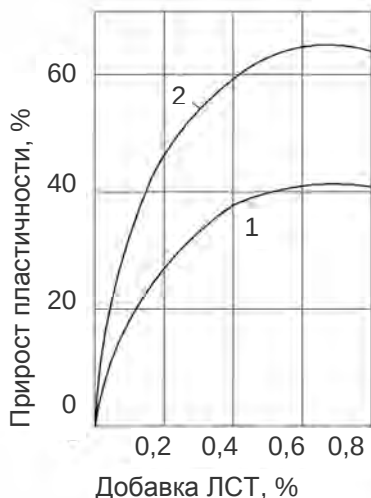


**Рис. 10.34.** Влияние содержания добавки ЛСТ на пластичность цемента различного минералогического состава: 1 — алюминатный цемент; 2 — алитовый цемент

Раствор из смеси пластифицированного портландцемента с нормальным песком состава 1:3 (по массе) при водоцементном отношении равном 0,4, после 30 встряхиваний на встряхивающем столике имеет расплыв конуса не менее 135 мм. Для непластифицированного портландцемента этот показатель 106-115 мм.

Применение пластифицированного портландцемента позволяет без увеличения расхода воды получить бетонную смесь большей подвижности и облегчить ее укладку или при неизменной подвижности и водоцементном отношении снизить на 8-12% расход цемента. При сохранении установленного расхода цемента и необходимой подвижности

уменьшается водоцементное отношение бетонной смеси, что приводит к повышению прочности, морозостойкости и водонепроницаемости бетона.

У пластифицированного портландцемента нарастание прочности в начальный период твердения оказывается несколько замедленным, хотя к 28 суточном возрасте отставание прочности обычно не наблюдается. Для достижения максимально возможной прочности важное значение имеет выбор оптимального содержания пластифицирующей добавки.

Гидрофобный портландцемент предложен М.И. Хигеровичем и Б.Г. Скрамтаевым. Его получают при введении в цемент в процессе измельчения таких гидрофобизирующих добавок как асидол, мылонафт, олеиновая кислота, кубовые остатки синтетических жирных кислот и пр. Технологический эффект при гидрофобизации цемента зависит от содержания ПАВ (рис. 10.35).

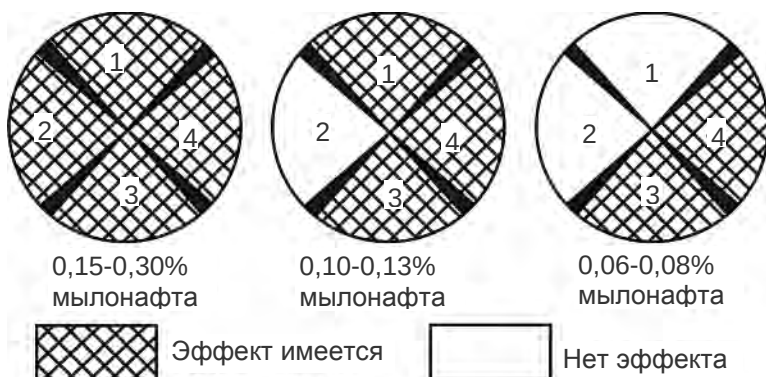


**Рис. 10.35.** Технологический эффект при гидрофобизации цемента (по М.И. Хигеровичу): 1 – интенсификация помола; 2 – сохранение активности; 3 – пластификация растворов и бетонов; 4 – повышение стойкости бетонов и растворов

Гидрофобизирующие добавки образуют на зернах цемента тончайшие адсорбционные слои – водонесмачиваемые оболочки, имеющие сетчатое строение. Капля воды на поверхности гидрофобного цемента не должна впитываться в течение 5 мин.

Гидрофобность портландцемента обуславливает его главное преимущество – высокую сохранность. Гидрофобные цементы не снижают активности в течение 1-2 лет даже в неблагоприятных условиях, в то время как обычные цементы уже через 3-6 мес. теряют до 30% и более начальной прочности. При затворении и перемешивании с водой этих цемента гидрофобные оболочки разрушаются, что обеспечивает нормальное течение процессов гидратации и твердения.

К цементу III типа относится *шлакопортландцемент* – продукт совместного тонкого измельчения клинкера, требуемого количества гипса и доменного (или электротермофосфорного) гранулированного шлака. По ГОСТ 31108-2003 содержание шлака может колебаться в шлакопортландцементе в пределах 36-65% (ЦЕМ III/A), по ГОСТ 10178-85 – 21-80 %.

Шлакопортландцемент является одним из наиболее эффективных видов вяжущих, так как при его производстве значительная часть клинкера заменяется более дешевым гранулированным шлаком.

## 10. Минеральные вяжущие вещества

ком. При использовании доменных шлаков для производства ШПЦ топливно-энергетические затраты на единицу продукции снижаются в 1,5-2 раза, а себестоимость – на 25-30%.

ШПЦ с содержанием шлака 25-40% обычно применяют в тех же условиях, что и обычный портландцемент. Цементы, содержащие 40...80% шлака, используются как низкотермичные в массивных гидросооружениях и в сооружениях, подвергающихся действию агрессивных вод, а также для изготовления изделий при тепловлажностной обработке.

Установлено, что на строительно-технические свойства ШПЦ и бетонов на его основе основные шлаки влияют благоприятнее, чем кислые.

Росту прочности ШПЦ содействует также применение клинкера с повышенным содержанием наиболее активных минералов ( $C_3S + C_3A = 65-75\%$ ). При этом для кислых шлаков желательно применять алитовые среднеалюминатные клинкеры ( $C_3S = 60-70\%$ ;  $C_3A \leq 8\%$ ).

Технологическая схема производства ШПЦ (рис. 10.36) предусматривает сушку гранулированного шлака до остаточной влажности 1-2% и совместное измельчение его с клинкером.

Цементная промышленность выпускает обычный, быстротвердеющий и сульфатостойкий шлакопортландцементы.

При производстве *сульфатостойкого шлакопортландцемента* используют клинкер с содержанием  $C_3A$  не более 8% и шлак с содержанием  $Al_2O_3$  не более 8%.

Для получения *быстротвердеющего шлакопортландцемента* рационален двухстадийный помол, т.е. предварительное измельчение клинкера с последующим совместным помолом клинкера и шлака до удельной поверхности не менее  $4000 \text{ см}^2/\text{г}$ .

Строительно-технические свойства ШПЦ характеризуются рядом особенностей по сравнению с портландцементом: более низкой плотностью ( $2,8-3 \text{ г/см}^3$ ); несколько замедленным схватыванием и нарастанием прочности в начальные сроки твердения. Особенно шлакопортландцемента, важной для заводского производства сборного железобетона, является интенсивный рост его прочности при пропаривании, особенно в области высоких температур. Наиболее интенсивно растет прочность при изгибе. Одновременно повышаются морозо-, соле- и трещиностойкость.

Пониженное содержание в ШПЦ свободного гидроксида кальция объясняет его более высокую стойкость против агрессивного воздействия мягких и сульфатных вод, а также к повышенным температурам. Морозостойкость ШПЦ несколько ниже морозостойкости портландцемента; она уменьшается с увеличением содержания шлака.

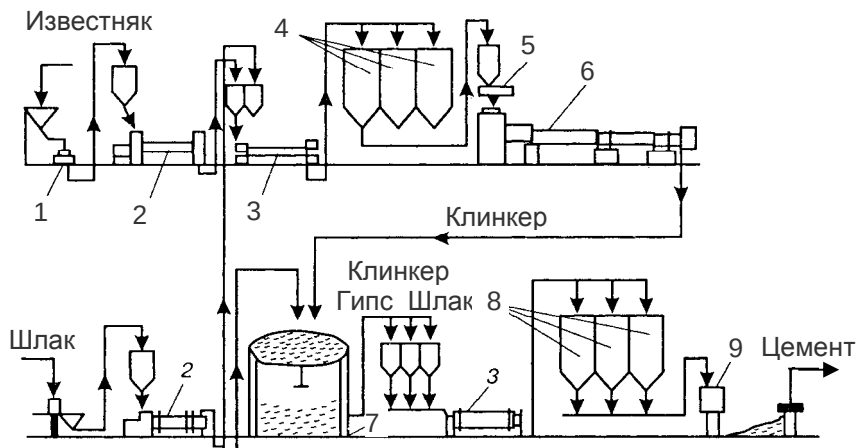


**Рис. 10.36.** Схема производства шлакопортландцемента:

- 1 – дробилка; 2 – сушильный барабан; 3 – мельница;
- 4 – смесительные силосы; 5 – смесительный шнек;
- 6 – вращающаяся печь; 7 – клинкерный склад;
- 8 – цементные силосы; 9 – упаковочная машина

Шлакопортландцемент можно эффективно применять для бетонных и железобетонных конструкций наземных, подземных и подводных сооружений.

*Пуццолановые цементы* (цементы IV типа) получают путем совместного тонкого измельчения портландцементного клинкера, необходимого количества гипса и активных минеральных добавок (кроме доменного или электрофосфорного гранулированных шлаков). Допустимое содержание активных минеральных добавок в пуццолановом цементе (цемент IV типа) в соответствии с ГОСТ 31108-2003 составляет 21-35%.

В *композиционный цемент* (цемент V типа) вводят при совместном измельчении клинкера добавку, состоящую из двух компонентов, один из которых является пуццоланой или близкой к ней до-

## 10. Минеральные вяжущие вещества

бавкой (зола-унос, глиеж или микрокремнезем), а другой – доменным или электрофосфорным гранулированным шлаком. Каждый из компонентов минеральных добавок в композиционный цемент вводят в пределах 11-30%.

Вещественный состав пуццоланового и композиционного цементов приведены в табл. 10.7.

Таблица 10.7

Состав цементов IV и V типов

| Тип цемента | Наименование          | Обозначение | Содержание, % по массе |                      |           |            |                             |                |                            |
|-------------|-----------------------|-------------|------------------------|----------------------|-----------|------------|-----------------------------|----------------|----------------------------|
|             |                       |             | Основные компоненты    |                      |           |            |                             |                | Вспомогательные компоненты |
|             |                       |             | Клинкер                | Гранулированный Шлак | Пуццолана | Зола-уноса | Глиеж или обожженный сланец | Микрокремнезем |                            |
| IV          | Пуццолановый цемент   | ЦЕМ IV/A    | 65-79                  | -                    | 21-35     |            |                             |                | 0-5                        |
| V           | Композиционный цемент | ЦЕМ V/A     | 40-78                  | 11-30                | 11-30     | -          | -                           | -              | 0-5                        |

Технология производства пуццолановых и композиционных цементов идентична технологии других видов портландцемента и отличается лишь подготовкой активных минеральных добавок – их дроблением и сушкой. Твердение этих видов цемента происходит в результате процессов гидратации и гидролиза клинкерных фаз и химического взаимодействия гидратных новообразований с активными компонентами добавок.

Повышенное содержание минеральных добавок в цементах приводит к уменьшению их плотности до 2,7-2,9 г/см<sup>3</sup> и боль-

шему объему цементного теста в бетонах и растворах при постоянном расходе цемента. Возрастает по мере роста содержания добавок до 30-35% нормальная густота цементов, особенно содержащих влагоемкие материалы осадочного происхождения (диатомит, трепел, опока и др.). Повышенная водопотребность цементов, в свою очередь, обуславливает повышение водопотребности бетонных и растворных смесей и, как следствие, ухудшение ряда конструктивно-технических свойств бетона.

Высокая непроницаемость и отсутствие или низкое содержание в затвердевшем цементном камне гидроксида кальция объясняют большую стойкость бетонов и растворов на пуццолановых и композиционных цементах, чем на обычных в мягких и минерализованных водах. Основными, кроме повышенной водопотребности, недостатками пуццолановых и близких к ним композиционных цементов являются замедленное нарастание прочности, особенно в первые сроки твердения, пониженная воздухоустойчивость характерная для цементов с добавками осадочного происхождения, повышенные деформации усадки и набухания, низкая морозостойкость.

Пуццолановые и композиционные цементы имеют пониженное тепловыделение, что позволяет их использовать преимущественно для внутренних и подводных частей массивных гидротехнических сооружений.

Развитие теоретических представлений о цементах с минеральными добавками и добавками ПАВ, создание эффективных суперпластификаторов цементных систем, позволили разработать смешанные вяжущие нового поколения, характеризующиеся низкой водопотребностью и высокой прочностью при сравнительно низком массовом соотношении клинкерной составляющей и минеральных добавок.

*Вяжущие низкой водопотребности* (ВНВ) получают совместным тонким помолом клинкера или готового портландцемента, активных или инертных минеральных добавок в присутствии порошкообразного суперпластификатора. Отличительными особенностями ВНВ являются высокая дисперсность ( $S_{уд}=4000-5000\text{см}^2/\text{г}$ ), низкая водопотребность (нормальная густота до 18%), высокая активность (до 100 МПа).

**Цементы специального назначения.** Для получения бетонов и растворов, стойких при повышенной концентрации сульфатов в водной среде предназначены *сульфатостойкие цементы*. Сульфатная коррозия имеет место в результате образования в затвердевшем цементном камне высокосульфатной формы гидросульфоалюмината кальция (этtringита), кристаллизующегося при значительном увеличении объема. Предотвратить образование этtringита возможно при уменьшении концентрации гидроксида кальция, образующегося при твердении, в основном, в результате гидролиза трехкальциевого силиката. Разработанные способы получения сульфатостойких цемента направлены на снижение содержания в клинкере  $C_3A$  и  $C_3S$  или введение при умеренном содержании этих минералов активных минеральных добавок, связывающих  $Ca(OH)_2$ .

В соответствии с ГОСТ 22266-94 в группу сульфатостойких цемента, выпускаемых цементной промышленностью, входят сульфатостойкий портландцемент и портландцемент с минеральными добавками, сульфатостойкий шлакопортландцемент и пуццолановый портландцемент. Нормированные требования к сульфатостойким цементам приведены в табл. 10.8.

В сульфатостойкие цементы допускается введение пластифицирующих и гидрофобизирующих ПАВ в количестве не более 0,3% от массы цемента в пересчете на сухое вещество добавки. Добавки ПАВ способствуют повышению сульфатостойкости бетонов и растворов в результате увеличения их плотности и уменьшения капиллярного всасывания.

Сульфатостойкий портландцемент и портландцемент с минеральными добавками могут быть использованы для бетонных и железобетонных конструкций, которые наряду с действием сульфатных вод подвергаются систематическому замораживанию и оттаиванию, увлажнению и высушиванию. Сульфатостойкий шлакопортландцемент и пуццолановый портландцемент применяются преимущественно для бетонов, эксплуатируемых в подземных и подводных сооружениях.



Требования ГОСТ 22266-94 к сульфатостойким цементам

| Показатели                                                                                                                                                                                                                                                        | Сульфато-стойкий портланд-цемент | Сульфато-стойкий портландцемент с минеральными добавками | Сульфато-стойкий шлако-портланд-цемент | Пуццолановый портланд-цемент |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|
| Характеристика клинкера:                                                                                                                                                                                                                                          |                                  |                                                          |                                        |                              |
| Содержание трехкальциевого силиката ( $C_3S$ ), %, не более                                                                                                                                                                                                       | 50                               | не нормируется                                           |                                        |                              |
| Содержание трехкальциевого алюмината ( $C_3A$ ), % не более                                                                                                                                                                                                       | 5                                | 8                                                        | 8                                      | 8                            |
| Сумма трехкальциевого алюмината и четырехкальциевого алюмоферрита ( $C_3A + C_4AF$ ), %, не более                                                                                                                                                                 | 22                               | не нормируется                                           |                                        |                              |
| Содержание $Al_2O_3$ , %, не более                                                                                                                                                                                                                                | 5                                | 5                                                        | 5                                      | 5                            |
| Содержание $MgO$ , %, не более                                                                                                                                                                                                                                    | 5                                | 5                                                        | 5                                      | 5                            |
| Характеристика цемента:                                                                                                                                                                                                                                           |                                  |                                                          |                                        |                              |
| Содержание активных минеральных добавок, %<br>(шлака и пуццолан для сульфатостойких портландцемента и портландцемента с минеральными добавками, доменного или электротермофосфорного шлака для шлакопортландцемента и пуццолан для пуццоланового портландцемента) | не допускается                   | свыше 10 и не более 20                                   | свыше * 40 и не более 60               | свыше 20 и не более 40       |

\* В сульфатостойком шлакопортландцементе допускается замена шлака пуццоланой или золой в количестве не более 10% от массы цемента.

Для возведения массивных бетонных сооружений при возведении плотин и других крупных гидротехнических сооружений применяют цементы с нормируемой экзотермией. К *низкотермичным* относят цементы с величиной тепловыделения в 3-суточном возрасте не более 230 Дж/г, в 7-суточном – не более 270 Дж/г при испытании термосным методом. *Умереннотермичными* считают цементы с величиной тепловыделения в 7-суточном возрасте не более 315 Дж/г.

В зависимости от зонального расположения бетона в сооружениях применяют цементы, в которых снижение экзотермии достигается ограничением содержания наиболее активных минералов ( $C_3A$  и  $C_3S$ ) или введением достаточного количества шлака, золы-уноса и других активных минеральных добавок.

Для цементирования нефтяных и газовых скважин предназначены *тампонажные* цементы. В скважины для подъема на поверхность нефти или газа опускают колонну стальных труб. Зазор между стенками скважины и трубами заполняется цементным раствором (рис. 10.37) с целью предотвращения возможных обвалов и разрушений, закрепления труб и предотвращения коррозии их под воздействием минерализованных вод. Кроме того, цементирование позволяет отделить продуктивные пласты от водоносных и предотвратить прорыв добываемого продукта в затрубное пространство. Тампонажный цементный раствор должен оставаться подвижным определенное время, пока идет цементирование. В зависимости от температуры скважины дифференцируются сроки схватывания цемента.

Тампонажные цементы должны характеризоваться необходимой прочностью в начальные сроки твердения. Прочность затвердевшего цементного раствора должна обеспечить закрепление колонны в стволе скважины, необходимую ее устойчивость при разбуривании и перфорации, эффективную изоляцию от проницаемых пород.

Цементный камень должен быть стоек по отношению к агрессивным пластовым водам на глубоких горизонтах и водонепроницаемым, чтобы защитить продуктивные нефтяные пласты от пластовых вод и обсадную колонну от проникновения корродирующих жидкостей, содержащих большое количество различных солей, а зачастую и сероводород.

В зависимости от назначения изготавливают тампонажные цементы для работы в условиях низких и нормальных, умеренных и повышенных температур.

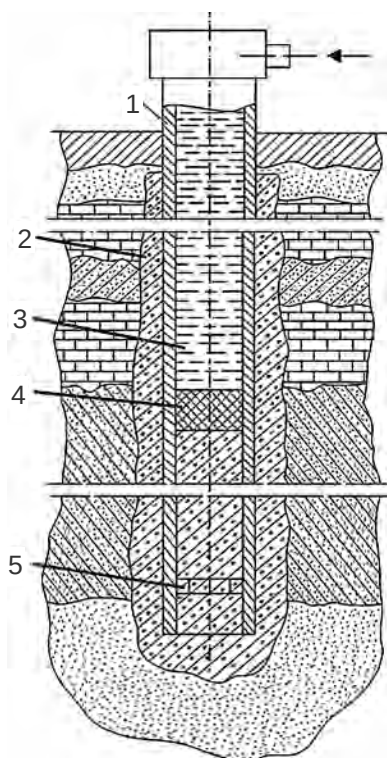


**Рис. 10.37.** Схема буровой скважины:

1 — обсадная труба; 2 — тампонажный цементный раствор; 3 — глинораствор; 4 и 5 — верхняя и нижняя пробки

По сульфатостойкости тампонажные цементы подразделяют на обычные, умеренной и высокой сульфатостойкости. Для цементов этого вида важно обеспечить высокую текучесть при минимальном водосодержании. Растекаемость цементного теста с 50% воды должна составлять не менее 180 мм. Начало схватывания тампонажных цементов должно наступать не раньше их закачивания в скважину. Тампонажные цементы для «холодных» скважин изготавливают из клинкера, содержащего  $C_3S + C_3A \geq 60\%$ , помолотом его до удельной поверхности  $2700-3500 \text{ см}^2/\text{г}$  при дозировке гипса 3-3,5%.

Для «горячих» скважин выпускаются цементы, содержащие 3-4%  $C_3A$ . При таком низком содержании трехкальцевого алюмината можно обеспечить необходимые сроки схватывания цемента при повышенных температурах.

С целью обеспечения необходимой седиментационной устойчивости и предотвращения расслоения растворов в цементы вводят минеральные добавки с большой удельной поверхностью (бентониты, диатомиты и др.). При повышенных температурах с целью предотвращения преждевременного загустевания растворов применяют менее активные добавки, например, опоки.

Для тампонажных растворов важнейшее значение имеют плотность и водонепроницаемость, сохраняемые в агрессивных минерализованных водах. Они достигаются применением цемента из высокоалитового, алюмоферритного клинкера, введением доменных гранулированных шлаков и применением добавок ПАВ, позволяющих наряду с уменьшением водосодержания обеспечить преобладание в цементном камне преимущественно закрытых пор.

При омоноличивании сборных железобетонных элементов, восстановлении железобетонных конструкций, гидроизоляции подземных сооружений, устройстве покрытий полов, возведении емкостей для хранения нефти и газа и др. возникает необходимость применения расширяющихся цементов.

В зависимости от величины энергии расширения различают *безусадочные, расширяющиеся* и *напрягающие* цементы. По классификации Г. Лосье расширяющиеся цементы подразделяют на виды в зависимости от показателя свободного расширения образцов из теста при хранении их в воде:

| цементы             | расширение, мм/м |
|---------------------|------------------|
| безусадочные        | 2-5              |
| слаборасширяющиеся  | 5-6              |
| среднерасширяющиеся | 8-10             |
| сильнорасширяющиеся | 12-15            |

К расширяющимся цементам, предназначенным для получения преднапряженных конструкций, в которых предварительное напряжение в арматуре создается в результате расширения цементного камня, относятся напрягающие цементы (НЦ).

Напрягающие цементы классифицируют в зависимости от достигаемого самоупругения на цементы с малой (НЦ-20), средней (НЦ-40) и высокой (НЦ-60) энергией расширения. Соответственно величина самоупругения, достигаемая данными цементами, должна быть не менее 2, 4 и 6 МПа.

К настоящему времени разработаны десятки видов расширяющихся цементов, получаемых на основе портландцемента, глиноземистого цемента и их композиций. В состав таких цементов входят расширяющиеся компоненты и некоторые добавки. В большинстве цементов расширение вызывается образованием гидросульфатно-

минатов кальция, гидратацией оксидов кальция и магния, реакцией образования активной газовой фазы.

Один из первых расширяющихся цементов был предложен Г. Лосье в 1944 г. Способ его получения заключается в совместном помоле портландцементного клинкера, расширяющегося компонента и гранулированного доменного шлака. Расширяющимся компонентом служит продукт обжига шихты, составленной из 50% гипса, 25% карбоната кальция и 25% боксита.

В 1942 г. В.В. Михайлов предложил слаборасширяющееся вяжущее, получаемое смешиванием портландцемента (не менее 85%), молотого высокоосновного гидроалюмината кальция и гипса (не более 10%). Высокоосновный гидроалюминат кальция ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ) получается при гидратации глиноземистого цемента и извести, взятых в соотношении 1:0,5 по массе.

И.В. Кравченко в 1954 г. был предложен расширяющийся портландцемент (РПЦ), имеющий следующий состав, %: портландцемент – 60-65; глиноземистый цемент (или высокоглиноземистый шлак) – 5-7; двуводный гипс – 7-10, активная минеральная добавка осадочного происхождения – 20-25.

О.П. Мчедлов-Петросян и В.И. Бабушкин разработали ряд расширяющихся составов на основе портландцемента. В качестве компонента, обеспечивающего расширение, была взята добавка сернокислого алюминия, который в твердеющем цементе обеспечивает получение этtringита. Для обеспечения согласования во времени процессов структурообразования с процессами образования этtringита были использованы добавки нитрата кальция и ЛСТ, а в качестве компенсатора внутренних напряжений – добавка алюминиевого порошка.

Цементы с удельной поверхностью 3000-4500  $\text{см}^2/\text{г}$  при соотношении портландцемента, глиноземистого цемента и гипса в пределах 70:16:14-64:20:16 с возможной добавкой извести до 5% обеспечивают расширение бетона достаточное для натяжения стальной арматуры при достижении прочности бетоном около 15 МПа.

Область рекомендованных составов цементного клинкера и соответствующие им значения самонапряжения приведены на треугольной диаграмме (рис. 10.38).

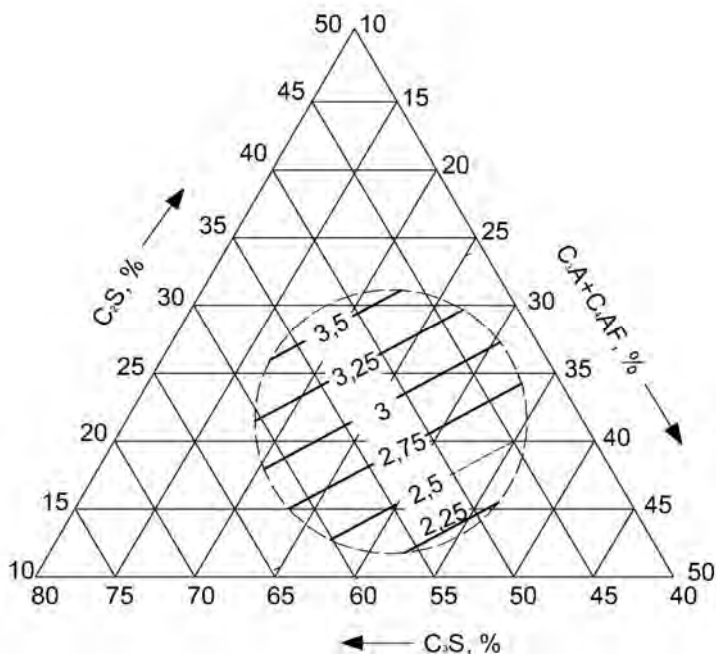


**Рис. 10.38.** Самонапряжение в МПа напрягающих цементов из промышленных клинкеров в 28-суточном возрасте в зависимости от минералогического состава клинкера

Зависимость величины расширения и самонапряжения НЦ от содержания глиноземистого компонента имеет экстремальный характер (рис. 10.39).

Величина расширения цементного камня резко уменьшается при увеличении соотношения  $Al_2O_3/SO_3$  (рис. 10.40).

Энергия расширения НЦ позволяет обеспечить двух- и трех-осное натяжение арматуры, трудно осуществимое механическим способом.

В группу *декоративных* входят белый и цветные цементы. *Белый цемент* является продуктом тонкого измельчения белого клинкера с необходимым количеством гипса. Белый цвет клинкера обеспечивается за счет сведения к минимуму содержания красящих оксидов, в первую очередь оксидов железа и марган-

ца. В лучших образцах белого портландцемента содержится не более 0,25-0,35%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и 0,005-0,0015%  $\text{MnO}$ .



**Рис. 10.39.** Зависимость расширения напрягающего цемента от количества глиноземистого компонента

*Цветные портландцементы* получают совместным тонким измельчением белого или цветного цементного клинкера, активной минеральной добавки и гипса. При применении белого клинкера для получения цветных цемента используют добавки пигментов.

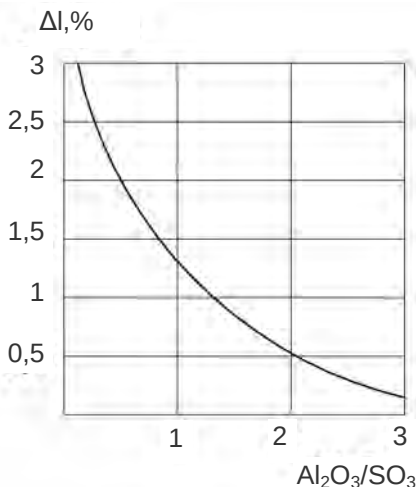


**Рис. 10.40.** Изменение расширения цементного камня ( $\Delta l$ ) в зависимости от отношения  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SO}_3$

Для получения белого портландцементного клинкера используют сырьевые материалы с минимальным содержанием красящих оксидов. Вращающиеся печи для обжига белого клинкера футеруются огнеупорами, не содержащими окрашивающих соединений. Для повышения белизны цемента клинкер подвергается отбеливанию (хлорирование, обжиг в восстановительной среде, быстрое охлаждение и др.) (рис. 10.41, 10.42).

П.И. Боженковым и Л.И. Холоповой разработан способ синтетического окрашивания цемента путем добавления в сырьевую шихту малых количеств соединений металлов, придающих определенный цвет клинкеру в процессе его обжига. Такие цементы названы *клинкерными* в отличие от цементов с добавкой пигментов.

При окрашивании цементного клинкера могут быть использованы два приема:

1. образование в клинкере самостоятельных цветных составляющих подобно алюмоферритам кальция;
2. окрашивание клинкерных фаз за счет введения малых количеств красителя в пределах их растворимости главными минералами клинкера – трех- и двухкальциевым силикатами.

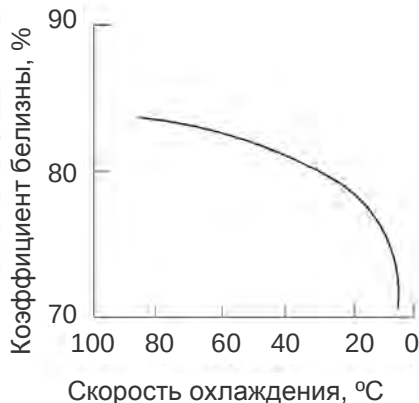


**Рис. 10.41** Зависимость коэффициента белизны клинкера от скорости охлаждения

### **Глиноземистые цементы и вяжущие на их основе.**

*Глиноземистые цементы* – быстротвердеющие гидравлические вяжущие вещества, включающие преимущественно низкоосновные алюминаты кальция и получаемые тонким измельчением продуктов плавления или спекания сырьевой смеси, состоящей из бокситов и известняков или извести. По содержанию  $Al_2O_3$  (ГОСТ 969-91) глиноземистые цементы подразделяются на виды: *глиноземистый* (ГЦ) и *высокогли-*

*ноземистые* I, II и III видов (ВГЦI, ВГЦII и ВГЦIII). Содержание  $Al_2O_3$  в этих цементах должно быть не менее соответственно 35; 60; 70 и 80%.

Характерные свойства глиноземистых цементов обусловлены, в основном, присутствием в их составе минерала – моноалюмината кальция  $CaO \cdot Al_2O_3$  (CA). Производство клинкера глиноземистых цементов может осуществляться плавлением в доменных или электрических, а также спеканием шихты во вращающихся печах. Распространение получил метод плавления. Тонкость помола глиноземистых цементов должна обеспечивать остаток на сите № 008 не более 10%.

Глиноземистые цементы – быстротвердеющие вяжущие, достигающие высокой прочности в первые сроки твердения. Марки их устанавливаются через 3 сут. твердения образцов в нормальных условиях.



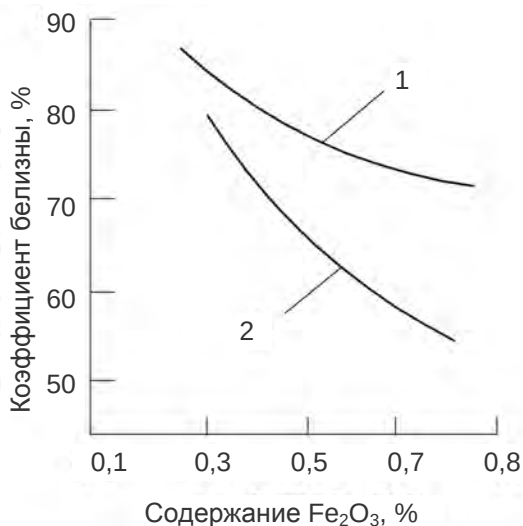


**Рис. 10.42.** Зависимость коэффициента белизны клинкера от содержания железа: 1 – закалка в воде; 2 – закалка на воздухе

По прочности на сжатие в возрасте 3 сут. цементы подразделяют на марки: для глиноземистого цемента – ГЦ-40, 50 и 60, высокоглиноземистых – ВГЦ I – 35, ВГЦ II – 25-35, ВГЦ III – 25. Нормируемые значения предела прочности при сжатии для указанных цементов марок приведены в табл. 10.9.

Резко негативно влияет на рост прочности глиноземистых цементов присутствие в воде затворения

хлоридов, а также затворение бетонной смеси морской водой. Глиноземистый цемент более чувствительный, чем портландцемент к содержанию в заполнителях пылеватых частиц.

Бетоны на глиноземистом цементе не подвергают пропариванию и автоклавной обработке. Недопустимо смешивание портландцемента и глиноземистого цемента, вызывающее резкое сокращение сроков схватывания смесей и снижение прочности, что объясняется содержанием в портландцементе гипса и выделением  $Ca(OH)_2$  при затворении его водой.

После 3-суточного возраста твердение глиноземистых цементов замедляется (рис. 10.42). Через 7 сут. прочность составляет примерно 120% 3-суточной, 28 сут. – 140% и 2 мес. – 160%.

Глиноземистый цемент устойчивее портландцемента по отношению к сульфатам и ряду других агрессивных сред. Бетоны на глиноземистом цементе могут эксплуатироваться при температуре до  $1300^{\circ}C$ , а с заполнителями из корунда и плавленного

## 10. Минеральные вяжущие вещества

оксида алюминия до 1600°C и выше. Наиболее высокая огнеупорность достигается при применении высокоглиноземистых цементов.

Таблица 10.9

Нормируемые (ГОСТ 969-91) значения прочности  
глиноземистых цементов

| Показатель                                                    | Значения для цемента вида и марки |      |      |       |        |    |         |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------|------|-------|--------|----|---------|
|                                                               | ГЦ                                |      |      | ВГЦ I | ВКЦ II |    | ВГЦ III |
|                                                               | 40                                | 50   | 60   | 35    | 25     | 35 | 25      |
| Предел прочности при сжатии, МПа, не менее, в возрасте 1 сут. | 22,5                              | 27,4 | 32,4 | -     | -      | -  | -       |
| 3 сут.                                                        | 40                                | 50   | 60   | 35    | 25     | 35 | 25      |

Целесообразность применения глиноземистого цемента возникает при аварийных и восстановительных работах, срочном ремонте специальных сооружений, ответственных железобетонных конструкций, промышленных сооружений и мостов. Его применяют при возведении подземных сооружений, скоростном тампонировании нефтяных и газовых скважин. Он эффективен в сооружениях, работающих в сульфатных, морских и других агрессивных средах. Применяется этот вид цемента также при зимнем бетонировании, для торкретирования.

На основе глиноземистого и высокоглиноземистого цементов изготавливают огнеупорные бетоны, по своим качественным показателям, относящимся к лучшим видам огнеупорных материалов.

Важной областью применения глиноземистого цемента является изготовление на его основе композиционных расширяющихся вяжущих. Из вяжущих этого типа получили распространение *водонепроницаемый расширяющийся цемент (ВРЦ) и гипсоглиноземистый цемент.*

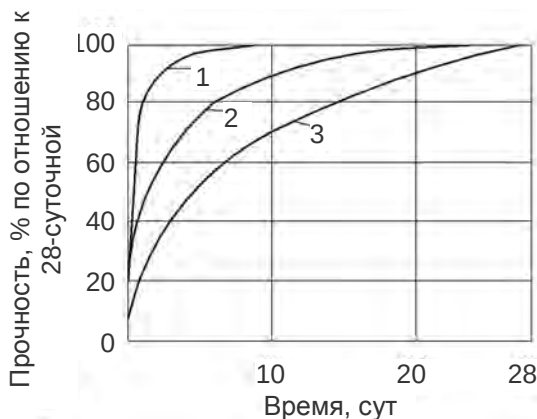


**Рис. 10.42.** Кривая роста прочности различных цементов: 1 – глиноземистый цемент; 2 – быстротвердеющий портландцемент; 3 – обыкновенный портландцемент

ВРЦ получают совместным помолом или тщательным смешиванием глиноземистого цемента, строительного или высокопрочного гипса и высокоосновного гидроалюмината кальция. Этот вид расширяющихся цементов разработан В.В. Михайловым в 1935-1941 гг. Оптимальный состав ВРЦ: глиноземистый цемент – 70-76%, полуводный гипс – 20-22%, высокоосновный

гидроалюминат кальция – 10-11%. Высокоосновный гидроалюминат имеет состав  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ . Его получают путем автоклавной обработки при температуре 120-150°C смеси глиноземистого цемента с известью-пушонкой состава 1:1 по массе, затворенной 30% воды.

Линейное расширение, твердеющих образцов из цементного теста нормальной густоты на основе ВРЦ должно составлять при воздушном хранении в возрасте 1 сут. не менее 0,05%, в 28 сут. – не менее 0,02%. При погружении в воду через час после затворения в возрасте 1 сут. расширение составляет не менее 0,2% и не более 1%.

Образцы ВРЦ из теста нормальной густоты или раствора состава 1:2 через 1 сут. после изготовления должны выдерживать давление воды до 0,6 МПа без признаков фильтрации.

Через 6 ч ВРЦ набирает до 25% 28-суточной прочности, 1 сут. – 50%, 3 сут. – 80% и 7 сут. – 90%. В 28 сут. прочность этого цемента составляет около 50 МПа.

*Гипсоглиноземистый расширяющийся цемент (ГГРЦ)* – высокопрочное быстротвердеющее гидравлическое вяжущее, по-

## 10. Минеральные вяжущие вещества

---

лучаемое при совместном помоле глиноземистого клинкера с природным двухводным гипсом. Содержание гипса в ГГРЦ рекомендуется в пределах 30%. При затворении этого цемента водой в результате взаимодействия гидроалюминатов с гипсом, образуются гидросульфалюминат кальция, вызывающий расширение твердеющего цементного камня.

Величина линейного расширения ГГРЦ при комбинированном водно-воздушном твердении через 1 сут. – не менее 0,15%, 3 сут. – 0,10%, при погружении в воду через 1 ч после конца схватывания в 1-суточном возрасте – не менее 0,15%, 3-суточном – не менее 0,1% и не более 0,6%.

Через сутки после изготовления цементный раствор состава 1:2 (цемент:песок) с В/Ц = 0,3 становится водонепроницаемым при рабочем давлении 1 МПа.

Предел прочности при сжатии ГГРЦ через 3 сут. твердения – не менее 28 МПа. Он составляет примерно 60-70% прочности исходного глиноземистого цемента. ГГРЦ значительно более устойчив при длительном воздействии повышенных температур, чем глиноземистый цемент при всех режимах твердения.

## 11. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

К композиционным можно отнести многофазные материалы, скомбинированные из различных компонентов с целью улучшения их эксплуатационных свойств. В общем случае матричной фазой композиционных материалов служит связующий компонент, находящийся в кристаллическом или аморфном состоянии. В матричной фазе, выполняющей роль дисперсионной среды, равномерно распределена дисперсная фаза, представленная полидисперсной смесью зерен, а также порами различного происхождения, волокнами и др.

Основными представителями строительных композиционных материалов (*комполитов*) на основе вяжущих веществ являются бетоны и растворы, железобетон. В эту группу входит и ряд других материалов и изделий.

### 11.1. Бетоны

Бетоны имеют решающее значение в современном строительстве. В общем случае *бетонами* называют искусственные каменные материалы, полученные в результате твердения неорганических (минеральных) или органических, а также комбинированных (органоминеральных) вяжущих веществ.

К настоящему времени отсутствует единая классификация бетонов. Применяют различные классификационные схемы для бетонов в зависимости от принятого в основу определяющего признака (табл. 11.1).

**Исходные материалы.** Матричной фазой бетона является искусственный камень, образованный при твердении цемента или другого вяжущего материала. При выборе вяжущих учитывают комплекс технических и технико-экономических показателей и, прежде всего достигаемые свойства бетона. наибольшее практическое значение для строительства имеют цементные бетоны (далее в тесте – "бетоны").

Наряду с вяжущими, выполняющими цементирующую функцию в бетоне, важнейшей его составной частью как композиционного, материала, занимающей до 80% его объема, являются *заполнители*.

## 11. Композиционные материалы на основе вяжущих веществ

Формируя каркас бетона, заполнители активно влияют на его свойства, снижая усадочные напряжения, увеличивая модуль упругости и уменьшая ползучесть, влияя на плотность и др.

Таблица 11.1

### Классификация бетонов

| Классификационный показатель        | Основные виды бетонов                                                                                         |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Вид вяжущего                        | Цементные, гипсовые, известковые, шлакощелочные, полимерные, полимерцементные                                 |
| Плотность                           | Тяжелые, особо тяжелые, легкие, особо легкие                                                                  |
| Вид заполнителя                     | Плотные, пористые, неорганические, органические                                                               |
| Крупность заполнителя               | Крупнозернистые, мелкозернистые, песчаные                                                                     |
| Удобоукладываемость бетонных смесей | Из сверхжестких, жестких, подвижных, литых смесей                                                             |
| Степень поризации                   | Плотные, поризованные, крупнопористые, ячеистые                                                               |
| Способ уплотнения                   | Вибрированные, трамбованные, прессованные, вибропрессованные, вибровакуумированные, центрифугированные, литые |
| Характерные свойства                | Высокопрочные, быстротвердеющие, сульфатостойкие, кислотостойкие, низкотермичные, декоративные и др.          |
| Назначение                          | Конструктивные, дорожные, гидротехнические, теплоизоляционные, радиационно-защитные, отделочные и др.         |

Основными классификационными признаками заполнителей бетона являются размер и форма зерен, насыпная плотность, пористость зерен, происхождение и методы получения, назначение (табл. 11.2).

Плотными заполнителями бетона служат обычно неорганические материалы, пористые бывают как неорганического, (керамзит, аглопорит, шлаковая пемза и др.), так и органического происхождения (древесные опилки, пенополистирол и др.)

Заполнитель характеризуют зерновым или гранулометрическим составом, определяемым просеиванием пробы через стандартные сита. При этом размеры отверстий сит, на которых остается или

проходит не менее 95% материала, считают соответственно наименьшей и наибольшей крупностью заполнителя. Выбор предельной крупности заполнителя зависит от размеров сечения конструкции и расстояния между арматурными стержнями. Обычно наибольшая крупность заполнителя должна быть не больше 1/4 минимального размера сечения конструкции и 2/3 расстояния между арматурными элементами.

Таблица 11.2

Классификация заполнителей бетона

| Классификационный показатель     | Вид заполнителей                                                                                         | Характеристика классификационного показателя                                             |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Размер зерен                     | мелкий<br>крупный                                                                                        | $\leq 5$ мм<br>$> 5$ мм                                                                  |
| Форма зерен                      | гравий<br>щебень                                                                                         | зерна окатанной формы<br>зерна остроугольной формы                                       |
| Насыпная плотность ( $\rho_0$ )  | тяжелые<br>легкие                                                                                        | $\rho_0 > 1100$ кг/м <sup>3</sup><br>$\rho_0 \leq 1100$ кг/м <sup>3</sup>                |
| Пористость (П)                   | плотные<br>пористые                                                                                      | $P \leq 10\%$<br>$P > 10\%$                                                              |
| Происхождение и методы получения | природные                                                                                                | Добываются из природных месторождений                                                    |
|                                  | дробленые                                                                                                | Получают дроблением горных пород                                                         |
|                                  | искусственные                                                                                            | Получают из природного сырья или отходов промышленности с помощью специальных технологий |
| Назначение                       | для тяжелых, легких, жаростойких, кислотостойких, гидротехнических, радиационно-стойких и других бетонов | Свойства заполнителей должны соответствовать необходимым свойствам бетонов               |

Характерные фракции крупного заполнителя, зерна которых имеют размеры в пределах определенного диапазона контрольных сит: 5-10, 10-20, 20-40, 40-80, 80-120 мм.

Для минимизации расхода вяжущего в бетоне при достижении требуемых физико-механических свойств желательно, чтобы зерновой состав заполнителей обеспечивал их наибольшую плотность. Для реальных заполнителей зерновой состав всегда отклоняется от идеальной кривой, максимально плотной смеси, поэтому в стандартах, нормирующих требования к крупному и мелкому заполнителям, указывают рекомендуемые области зерновых составов (рис. 11.1, табл. 11.3), выход за пределы которых приводит к существенному перерасходу цемента. Пустотность заполнителей регулируется их фракционированием с последующим смешиванием определенных фракций в необходимом соотношении.

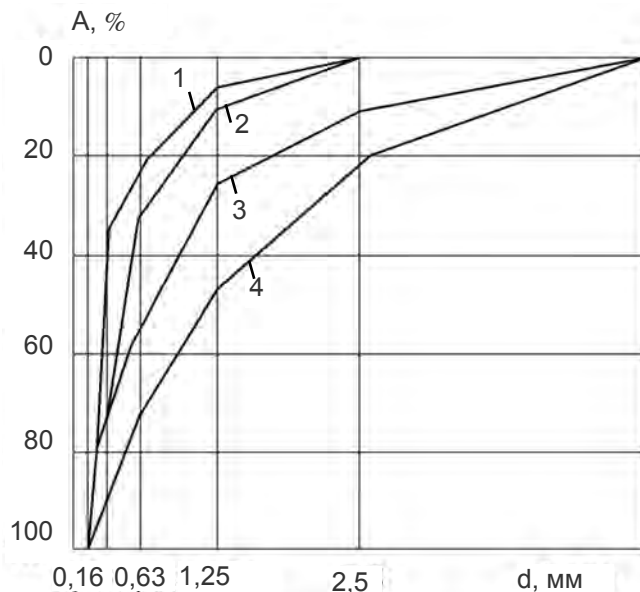


**Рис. 11.1.** Зерновой состав песка для бетонов:

- 1,2— нижняя граница крупности, которая допускается ( $M_{кр}=1,5$ ) и рекомендуется ( $M_{кр}=2$ ); 3,4— верхняя граница крупности, которая рекомендуется ( $M_{кр}=2,5$ ) и допускается ( $M_{кр}=2,25$ );  
 A — полный остаток на ситах размером d



Таблица 11.3

Рекомендуемый зерновой состав крупного заполнителя для тяжелых бетонов

| Наибольшая крупность заполнителя | Содержание фракций в крупном заполнителе, % |                |                |                |                 |
|----------------------------------|---------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|                                  | От 5(3) до 10 мм                            | Св.10 до 20 мм | Св.20 до 40 мм | Св.40 до 80 мм | Св.80 до 120 мм |
| 10                               | 100                                         | -              | -              | -              | -               |
| 20                               | 25-40                                       | 60-75          | -              | -              | -               |
| 40                               | 15-25                                       | 20-35          | 40-65          | -              | -               |
| 80                               | 10-20                                       | 15-25          | 20-35          | 35-55          | -               |
| 120                              | 5-10                                        | 10-20          | 15-25          | 20-30          | 30-40           |

Интегральной характеристикой крупности, широко применяемой для оценки качества песка, является *модуль крупности*:

$$M_k = \frac{A}{100}, \quad (11.1)$$

где  $A$  – сумма полных остатков на контрольных ситах, %:

$$A = A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16}. \quad (11.2)$$

Полные остатки на каждом из сит находят, суммируя частные остатки на данном сите и ситах с более крупными отверстиями.

Песок для строительных работ (ГОСТ 8736-93) подразделяют на группы по крупности: очень крупный –  $M_k > 3,5$ ; повышенной крупности  $M_k = 3-3,5$ ; крупный  $M_k = 2,5-3,0$ ; средний  $M_k = 2-2,5$ ; мелкий  $M_k = 1,0-1,5$ ; тонкий  $M_k = 0,7-1,0$  и очень тонкий – до 0,7. Очень мелкие, тонкие и очень тонкие пески в качестве мелкого заполнителя бетонов обычно не применяют, поскольку их использование сопряжено с резким увеличением водопотребности бетонных смесей и необходимого расхода цемента.

На качество заполнителей существенно влияет содержание пылевидных, глинистых и илистых примесей, определяемых обычно способом отмучивания. К пылевидным относят частицы крупностью свыше 0,005 до 0,05 мм, к глинистым и илистым – до 0,005 мм. Ограничение содержания отмучиваемых примесей в песке и щебне (гравии) обусловлено отрицательным влиянием образуемых ими пленок на сцепление цементного камня с заполнителями, и, как следствие, на прочность, морозостойкость и другие свойства бето-

на, водопотребность бетонных смесей. Содержание отмучиваемых частиц в природном песке допускается до 3%, в обогащенном – 2%, в дробленном – до 5% (с учетом группы крупности). Содержание отмучиваемых частиц в составе щебня и гравия из изверженных и метаморфических пород не должно превышать 1%, в щебне из осадочных пород (в зависимости от прочности бетона) ограничивается в пределах 1-3%, в том числе глины в комьях – не более 0,25%. Кроме отмучиваемых примесей, в заполнителях может присутствовать ряд других вредных примесей, способствующих снижению прочности и долговечности бетона (уголь, слюды, цеолиты и др.); ухудшающих качество поверхности и вызывающих внутреннюю коррозию (аморфные разновидности диоксида кремния, хлорит, магнетит и др.); и коррозию арматуры (галоиды, сульфиды, сульфаты и др.).

Прочность щебня и гравия характеризуется по ГОСТ 8267-93 их маркой по прочности, определяемой по дробимости при сжатии (раздавливании) в цилиндре в зависимости от величины потерь массы. Марки по прочности для щебня и изверженных пород колеблются от 600 до 1400 при потерях массы для интрузивных пород от 34 до 12% и эффузивных – от 20 до 9%. Для щебня из осадочных и метаморфических пород марки по дробимости от 200 до 1200 при потерях массы от 35 до 11%.

К заполнителям бетона, как и другим строительным материалам, предъявляются требования по *содержанию природных радионуклидов*. Для всех видов строительства могут применяться материалы с суммарной удельной активностью природных радионуклидов не более 370 Бк/кг (I класс). Материалы с удельной активностью природных радионуклидов от 370 до 740 Бк/кг (II класс) могут быть использованы для дорожного и промышленного строительства в границах территории населенных пунктов. При активности более 740, но ниже 1350 Бк/кг (III класс) заполнители могут использоваться в строительстве за пределами населенных пунктов.

Качество бетона в значительной мере зависит не только от качественных показателей вяжущего и заполнителей, но и от качества *воды затворения*. Вода затворения является активным компонентом, обеспечивающим твердение цементного камня и необходимую удобоукладываемость бетонной смеси.

Для затворения бетонных смесей рекомендуется применять воду с водородным показателем pH в пределах 4-12,5. Важное значение имеет ограничение в воде вредных примесей, препятствующих нормальному схватыванию и твердению цемента и способствующих образованию в бетоне веществ, снижающих его прочность и долговечность. К замедлению скорости процессов гидратации и снижению прочности бетона приводят примеси в воде ряда органических веществ: сахаров, фенола, нефтепродуктов, жиров, масел и др. Содержание органических ПАВ, сахаров и фенола не должно превышать 10 мг/л. Примеси в воде нефтепродуктов и жиров оседают на поверхности зерен цемента и заполнителей при замешивании бетонной смеси и ухудшают качество контактной зоны. Растворимые соли при повышенной концентрации кристаллизуются в порах цементного камня и образуют на поверхности бетона высолы.

Максимально допустимое содержание в воде затворения, вредных примесей приведено в табл. 11.4.

Таблица 11.4

Максимально допустимое содержание вредных примесей в воде для бетонов и растворов, мл/л

| Назначение воды                                                                                                                                                                                                                       | Раствори-<br>мые соли | Ионы<br>$\text{SO}_4^{2-}$ | Ионы<br>$\text{Cl}^-$ | Взвешен-<br>ные час-<br>тицы |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Изготовление напряжен-<br>ных железобетонных кон-<br>струкций                                                                                                                                                                         | 2                     | 0,6                        | 0,35                  | 0,2                          |
| Изготовление бетонных и<br>железобетонных конструк-<br>ций с ненапряженной ар-<br>матурой                                                                                                                                             | 5                     | 2,7                        | 1,2                   | 0,2                          |
| Изготовление бетонных<br>неармированных конст-<br>рукций, к которым предъ-<br>являются требования по<br>ограничению образования<br>высолов, а также бетона и<br>железобетона подводной и<br>внутренней зоны массив-<br>ных сооружений | 0                     | 2,7                        | 3,5                   | 0,3                          |

Наиболее универсальным и эффективным способом модифицирования структуры и регулирования свойств бетона является введение в бетонную смесь дополнительных компонентов – *добавок*. В

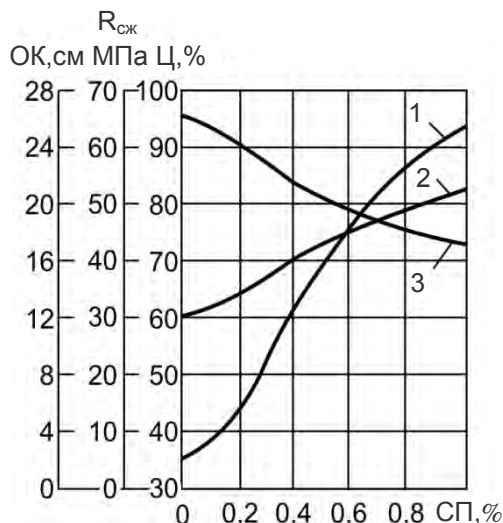


**Рис. 11.2.** Влияние содержания суперпластификатора на свойства бетона и бетонной смеси (по Ю.М. Баженову): 1 – изменение подвижности смеси при введении суперпластификатора и постоянных расходах цемента и воды; 2 – повышение прочности бетона при постоянной подвижности смеси и расходе цемента за счет сокращения расхода воды; 3 – уменьшение расхода цемента в равнопрочных бетонах при одинаковой подвижности бетонной смеси

настоящее время в экономически развитых странах практически весь выпускаемый бетон изготавливается с применением разнообразных добавок. Номенклатура известных добавок чрезвычайно многообразна. Они, как правило, оказывают комплексное (полифункциональное) воздействие на бетонные смеси и затвердевший бетон.

Всю совокупность добавок в бетон условно разделяют на химические и минеральные. Химические добавки (модификаторы) вводят в бетон в сравнительно небольшом количестве (до 10% от массы цемента), они могут быть по составу как неорганическими, так и органическими. Отдельно выделяют полимерные добавки для получения полимерцементных бетонов. Минеральные добавки

могут быть введены в значительно большем количестве, чем химические добавки.

Имеются различные классификации добавок по механизму их действия, составу и основному техническому эффекту.

В соответствии с ГОСТ 24211-91 добавки для цементных бетонов в зависимости от основного эффекта их действия подразделяют на 4 вида: регулирующие свойства бетонной смеси (пластифицирующие, стабилизирующие, водоудерживающие, улучшающие перекачиваемость и др.); регулирующие твердение бетона; повышающие прочность, морозостойкость, коррозионную стойкость, водонепроницаемость (водоредуцирующие, кольматирующие, воздухововлекающие и др.); придающие бетону специальные свойства (противоморозные, гидрофобизирующие).

В технологии бетона наибольшее распространение получили пластифицирующие добавки (*пластификаторы*), улучшающие подвижность бетонной смеси без увеличения водосодержания и снижения прочности. Они позволяют также уменьшать водосодержание без ухудшения удобоукладываемости бетонных смесей и достигать улучшения основных свойств бетона или при заданных свойствах бетона уменьшать необходимый расход цемента (рис. 11.2). В соответствии с эффективным пластифицирующим действием, т.е. увеличением подвижности бетонной смеси без снижения прочности бетона, пластификаторы делят на 4 категории (табл. 11.5).

Таблица 11.5

Классификация пластификаторов бетонных смесей

| Категория | Наименование         | Эффективное пластифицирующее действие (увеличение ОК с 2...4 см), см | Уменьшение количества воды, % |
|-----------|----------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| I         | Супер-пластификаторы | До 20 и более                                                        | не менее 20                   |
| II        | Пластификаторы       | 14...19                                                              | не менее 10                   |
| III       | Пластификаторы       | 9...13                                                               | не менее 5                    |
| IV        | Пластификаторы       | 8 и менее                                                            | менее 5                       |

*Суперпластификаторы* (СП) начали применять в производстве бетона в начале 1970-х годов. Благодаря им оказалось возможным существенно улучшить свойства бетона без увеличения расхода це-

## 11. Композиционные материалы на основе вяжущих веществ

мента, получать бетоны из самоуплотняющихся смесей при умеренном водосодержании, высокопрочные бетоны на обычных портландцементных и заполнителях, обладающие низкой проницаемостью, высокой коррозионной стойкостью и т.д.

Введение СП является в настоящее время обязательным условием производства высококачественных, высокотехнологичных бетонов (High Performance Concrete – НРС).

Принятая в настоящее время классификация суперпластификаторов (табл. 11.6) разделяет их по составу и механизму действия.

Таблица 11.6

Классификация суперпластификаторов

| Обозначения | Состав СП                                                        | Механизм действия   |
|-------------|------------------------------------------------------------------|---------------------|
| НФ          | На основе сульфированных нафталинформальдегидных поликонденсатов | Электро-статический |
| МФ          | На основе сульфированных меламиноформальдегидных поликонденсатов | Электро-статический |
| ЛСТ         | На основе очищенных от сахаров лигносульфонатов                  | Электро-статический |
| П           | На основе поликарбоксилатов и полиакрилатов                      | Стерический         |

В группу *ускорителей твердения* входят, как правило, соли-электролиты, основным эффектом которых является ускорение твердения (в ряде случаев и схватывания) бетонных смесей.

Из ускорителей твердения одним из первых был исследован хлорид кальция. Эта добавка была предложена еще в 1885 г. У.Миллером и С.Николсом. Ускоряющее действие хлорида кальция объясняется повышением растворимости клинкерных минералов цемента, образованием комплексных малорастворимых соединений, каталитическим и модифицирующим влиянием при гидратации цемента. Применение его в бетоне, однако, ограничено из-за ускорения коррозии стальной арматуры и понижения стойкости цементного камня в сульфатной среде.

В качестве ускорителей схватывания и твердения применяют также сульфаты натрия и калия, нитраты натрия и кальция, хлорное железо, хлорид и сульфат алюминия и другие соли-электролиты.

Для предотвращения коррозии стальной арматуры предложены добавки, совмещающие ингибиторы с ускорителями твердения, например, в виде нитрит-нитрата хлорида кальция и др.

Многие добавки – ускорители твердения являются также *противоморозными*, обеспечивающими твердение бетона при пониженных, в том числе и отрицательных температурах.

Стремление универсализовать действие добавок усилить их технический эффект обусловили широкое распространение комплексных (композиционных) добавок. На рис. 11.3 приведена одна из возможных схем формирования комплексных добавок различного назначения на основе пластифицирующих ПАВ.



Рис. 11.3. Диаграмма формирования комплексных добавок (по А.В. Ушерову-Маршаку)

В группу *минеральных добавок* относят неорганические порошкообразные вещества, вводимые в бетонную смесь для экономии цемента и регулирования свойств бетона. Минеральные добавки часто называют наполнителями (микронаполнителями) бетона. Их разделяют на активные и инертные.

*Активные минеральные добавки* способны вступать при нормальной температуре в химическую реакцию с гидроксидом кальция с образованием гидросиликатов и других гидратов. Активность добавок измеряют по количеству  $\text{CaO}$  в мг, поглощенного 1 г добавки из водного раствора извести в течение 30 сут. Она колеблется от 50-100 для золы-уноса до 350-400 мг  $\text{CaO}$  на 1 г добавок для некоторых природных материалов осадочного происхождения (опока, трепел и др.).

Такие добавки как доменные гранулированные шлаки содержат вещества, обладающие при определенных условиях (тепловлажностная обработка, введение активизаторов) вяжущими свойствами. Другие добавки преимущественно пуццоланового типа (низкокальцивая зола-унос, ряд других техногенных продуктов, а также природных материалов вулканического или осадочного происхождения) приобретают вяжущие свойства лишь в смеси с известью.

К высокоактивным минеральным добавкам в бетон, все шире применяемым в последние десятилетия, относятся ультрадисперсные отходы производства ферросплавов, т.н. *микрокремнезем* (МК). Микрокремнезем представляет собой конденсированный аэрозоль, улавливаемый фильтрами систем газоочистки плавильных металлургических печей. Он содержит частицы сферической формы со средним диаметром 0,1 мкм (рис. 11.4) и удельной поверхностью 15-25 м<sup>2</sup>/г и выше. Его насыпная плотность – 150-250 кг/м<sup>3</sup>. Микрокремнезем как добавка в бетоны был впервые предложен в начале 50-х, а начал массово использоваться с начала 70-х годов прошлого столетия в Норвегии, а затем и других странах.

Наряду с МК в качестве эффективных модификаторов бетона при определенных условиях (высокая дисперсность, сочетание с суперпластификаторами и др.) могут служить и другие минеральные материалы – метакаолин, цеолиты и др.

**Получение и свойства бетонных смесей.** Бетонные смеси изготавливают на бетонных заводах, стационарных или мобильных установках, автобетоносмесителях, загруженных сухими отдозированными компонентами. На предприятиях сборного железобетона бе-



тонные смеси изготавливают в бетоносмесительных цехах. На строительные объекты поставляют преимущественно готовые бетонные смеси, возможна поставка также сухих смесей из отдозированных компонентов.

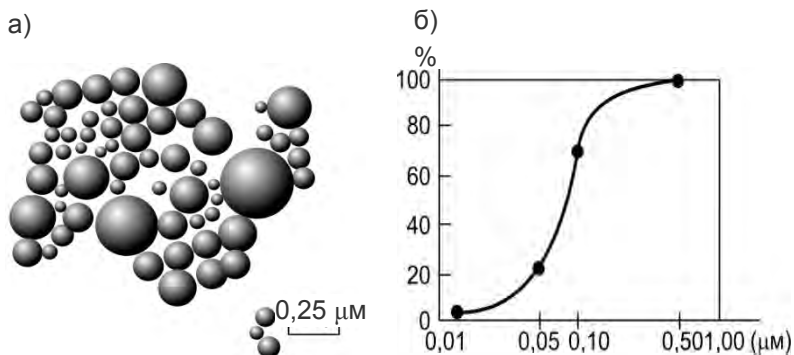


**Рис. 11.4.** Основные характеристики микрокремнезема: а – форма и размер зерен; б – кривая гранулометрического состава

Производство бетонных смесей на современных бетонных заводах состоит из ряда транспортно-складских, вспомогательных и основных технологических процессов. К основным технологическим операциям относятся: дозирование цемента, воды, заполнителей и добавок и их перемешивание до достижения однородной смеси заданного состава. Бетонные заводы и установки (рис. 11.5) классифицируют: по конструкции – на *стационарные* и *инвентарные*, *сборно-разборные* и *передвижные (мобильные)*; по принципу работы – на предприятия *циклического* и *непрерывного* действия; по компоновке оборудования – на *партерные (двухступенчатые)* и *высотные (одноступенчатые)*.

В условиях современных темпов строительства все более эффективными становятся мобильные бетонные заводы. Они позволяют осуществлять оперативное перебазирование с одной строительной площадки на другую, приближая производство бетонной смеси к месту ее укладки.

Бетоносмесительные установки циклического действия с периодически повторяемыми технологическими операциями лучше для предприятий, изготавливающих бетоны различных классов по прочности. Установки непрерывного действия эффективны при

массовом производстве бетонов одинаковой прочности, например в гидротехническом и дорожном строительстве.

Основным преимуществом вертикальной компоновки является меньшая площадь, необходимая для бетоносмесительной установки, партерной схемы – меньшая высота. При партерной схеме облегчается монтаж, однако возрастает число единиц приемного оборудования для материалов и перегрузок последних. Партерные установки являются лучшими для мобильных заводов, которые часто перебазированы.

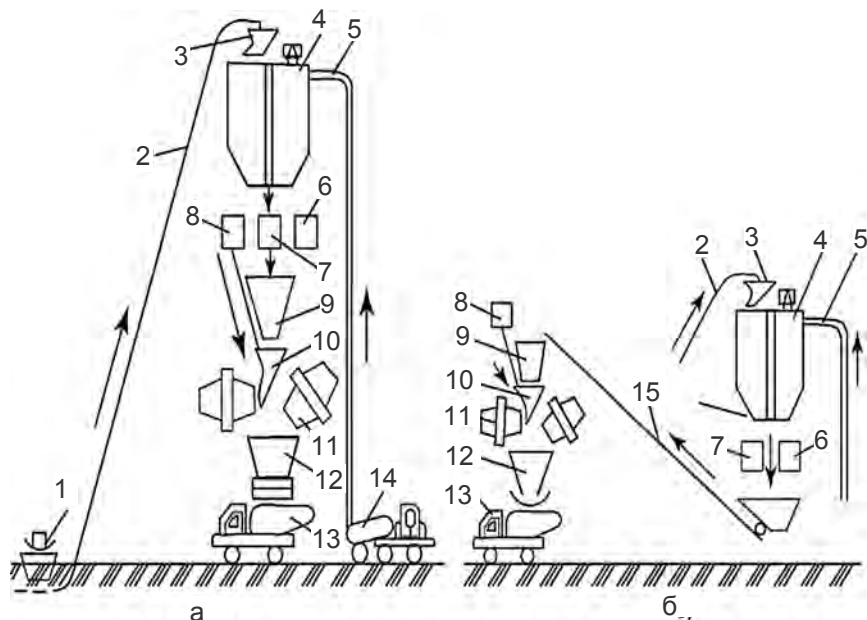


**Рис. 11.5.** Схемы компоновки бетоносмесительных установок: а – башенная (вертикальная); б – двухступенчатая (партерная): 1 – конвейер склада заполнителей; 2 – конвейер подачи заполнителей в расходные бункера; 3, 9, 10 – поворотная направляющая, распределительная воронка; 4 – расходный бункер; 5 – трубы пневмоподачи цемента; 6, 7, 8 – дозаторы цемента, заполнителей, воды; 11 – бетоносмеситель; 12 – раздаточный бункер; 13 – автобетоновоз; 14 – автоцементовоз; 15 – скиповый подъемник или конвейер

На современных бетонных заводах большинство основных технологических операций автоматизировано.

*Бетонная смесь* – грубодисперсная гетерогенная система, которую можно отнести к структурированным вязким жидкостям. В статическом состоянии она характеризуется наличием внутреннего трения между твердыми компонентами, особенно между зернами заполнителя. При динамическом уплотнении бетонной смеси (вибрировании или встряхивании) силы внутреннего трения значительно уменьшаются и смесь начинает вести себя как вязкая тяжелая жидкость. При прекращении действия внешних сил силы внутреннего трения и сцепления восстанавливаются (*тиксотропия*). В основе современной технологии бетона лежит вибрационное разжижение бетонной смеси. Наряду с составом бетонных смесей на величину их вязкости в условиях вибрирования влияют амплитудно-частотные характеристики колебаний. С увеличением амплитуды вибрирования при постоянной частоте вязкость бетонных смесей снижается.

Под *удобоукладываемостью* бетонных смесей понимают их способность заполнять форму или опалубку и уплотняться под воздействием механических усилий.

Мерой удобоукладываемости подвижных смесей является показатель *осадки или распыла нормального конуса* (конуса Абрамса) в см из свежеформованной бетонной смеси. Для жестких бетонных смесей мерой удобоукладываемости является показатель жесткости в с, определяемый временем, необходимым для растекания и превращения под действием вибрирования в равновеликий цилиндр конуса из бетонной смеси (*способ Вебе*).

Наряду с указанными, предложен ряд других нестандартизованных способов оценки удобоукладываемости бетонных смесей, основанных на измерении времени их истечения, пенетрации шарика и др.

В зависимости от показателей подвижности по осадке конуса и жесткости по Вебе установлены марки бетонной смеси по удобоукладываемости (табл. 11.7).

На показатели удобоукладываемости оказывают влияние продолжительность и температура выдерживания смеси до укладки. Изменение удобоукладываемости бетонной смеси при ее выдерживании обусловлено гидратацией цемента, поглощением воды заполнителями и ее испарением. Снижение удобоукладываемости во времени зависит от минералогического состава и тонкости помола

цемента, вида и содержания добавок, плотности и влажности заполнителей, водосодержания смеси.

Таблица 11.7

## Марки бетонной смеси по удобоукладываемости

| Марка              | Норма удобоукладываемости по показателю |                  |                   |
|--------------------|-----------------------------------------|------------------|-------------------|
|                    | жесткости,<br>с                         | подвижности, см  |                   |
|                    |                                         | осадка<br>конуса | расплыв<br>конуса |
| Сверхжесткие смеси |                                         |                  |                   |
| СЖ3                | более 100                               | -                | -                 |
| СЖ2                | 51-100                                  | -                | -                 |
| СЖ1                | 50 и менее                              | -                | -                 |
| Жесткие смеси      |                                         |                  |                   |
| Ж4                 | 31-60                                   | -                | -                 |
| Ж5                 | 21-30                                   | —                | -                 |
| Ж2                 | 11-20                                   | —                | -                 |
| Ж1                 | 5-10                                    | —                | -                 |
| Подвижные смеси    |                                         |                  |                   |
| П1                 | 4 и менее                               | 1-4              | -                 |
| П2                 | —                                       | 5-9              | -                 |
| П3                 | —                                       | 10-15            | -                 |
| П4                 | —                                       | 16-20            | 26-30             |
| П5                 | —                                       | 21 и более       | 31 и более        |

При повышении температуры бетонной смеси на каждые 5°С в диапазоне 20-35°С водопотребность, необходимая для поддержания стабильной удобоукладываемости, возрастает на 2-4%.

Основное влияние на показатели подвижности и жесткости бетонной смеси оказывает содержание воды, находящейся в межзерновом состоянии в механически связанном состоянии. В свежеприготовленной бетонной смеси ее количество составляет 93-95% массы всей воды, к концу схватывания цемента оно уменьшается до 70-75% и соответственно возрастает количество физико-химически и химически связанной воды. Взаимосвязь показателей удобоукладываемости бетонной смеси и расхода воды показана на рис. 11.6 и табл. 11.8.

На значения необходимого водосодержания для обеспечения требуемого показателя подвижности или жесткости существенное влияние оказывают крупность, форма зерен и другие особенности заполнителей, которые интегрально характеризуются показателями их водопотребности, химико-минералогический состав цемента, его дисперсность, вид и содержание вводимых в него добавок, добавки, вводимые непосредственно в бетонную смесь.

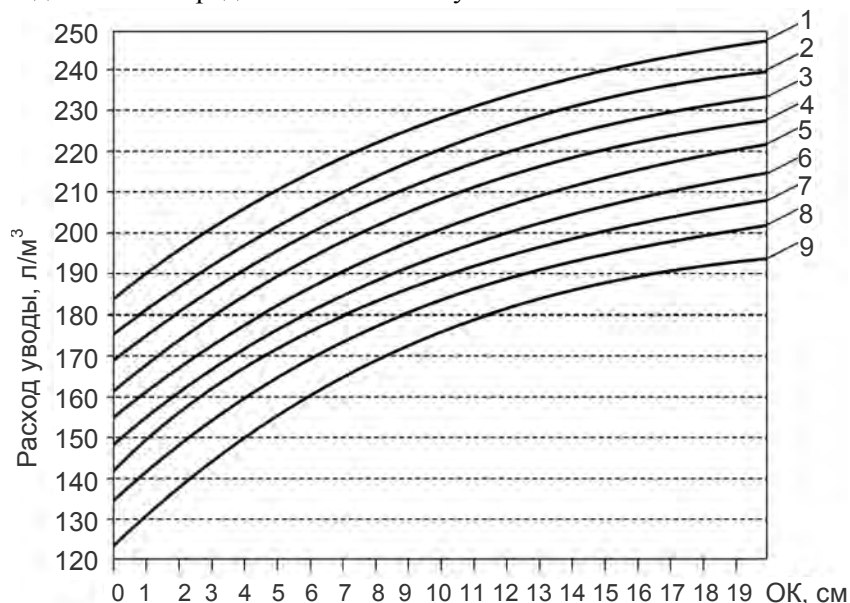


**Рис. 11.6.** Зависимость расхода воды на 1 м<sup>3</sup> бетона от подвижности бетонных смесей. 1 – песок Мк = 3; 2-9 – щебень гранитный крупностью 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80 и 150 мм

Показатели *водопотребности* песка и щебня было предложено определять Б.Г. Скрамтаевым и Ю.М. Баженовым путем сравнительных испытаний цементного теста, растворной и бетонной смеси. Для определения водопотребности песка приготавливают на нем растворную смесь состава цемент:песок 1:2, имеющую такую же подвижность по расплыву на встряхивающем столике (170 мм) как и цементное тесто, консистенция которого примерно соответствует его нормальной густоте. Показатель водопотребности песка ( $B_n$ ) вычисляют по формуле:

$$B_{\Pi} = \frac{(B/\Pi)_{\text{p}} - (B/\Pi)_{\text{ц}}}{2} \cdot 100, \quad (11.3)$$

где  $(B/\Pi)_{\text{p}}$  и  $(B/\Pi)_{\text{ц}}$  – значения водоцементного отношения равноподвижных растворной смеси и цементного теста.

Таблица 11.8

## Водопотребность бетонной смеси

| Удобоукладываемость |                              |                       | Расход воды, л/м <sup>3</sup> , при максимальной крупности заполнителей, мм |     |     |        |     |     |
|---------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----|-----|--------|-----|-----|
| Осадка конуса, см   | Жесткость, с                 |                       | гравий                                                                      |     |     | щебень |     |     |
|                     | по стандартному вискозиметру | по техн. вискозиметру | 10                                                                          | 20  | 40  | 10     | 20  | 40  |
| 0                   | 31                           | 120-90                | 150                                                                         | 135 | 125 | 160    | 145 | 135 |
| 0                   | 30-20                        | 80-60                 | 160                                                                         | 145 | 130 | 170    | 155 | 145 |
| 0                   | 20-11                        | 50-30                 | 165                                                                         | 150 | 135 | 175    | 160 | 150 |
| 0                   | 10-5                         | 15-30                 | 175                                                                         | 160 | 145 | 185    | 170 | 155 |
| 1...2               | -                            | -                     | 185                                                                         | 170 | 155 | 195    | 180 | 165 |
| 3...4               | -                            | -                     | 195                                                                         | 180 | 165 | 205    | 190 | 175 |
| 5...6               | -                            | -                     | 200                                                                         | 185 | 170 | 210    | 195 | 180 |
| 7...8               | -                            | -                     | 205                                                                         | 190 | 175 | 215    | 200 | 185 |
| 9...10              | -                            | -                     | 215                                                                         | 200 | 185 | 225    | 210 | 195 |

**Примечания.** 1. Таблица составлена для песков с водопотребностью  $B_{\Pi}=7\%$ . При увеличении  $B_{\Pi}$  на каждый процент расход воды повышается на 5 л, а при уменьшении  $B_{\Pi}$  сокращается соответственно на 5 л. 2. Если используют мелкий песок, то расход воды повышается на 10 л, крупный – сокращается на 10 л.

Водопотребность щебня устанавливают путем сравнительных испытаний равноподвижных растворной смеси состава 1:2 и бетонной смеси состава цемент:песок:щебень 1:2:3,5. Показатель водопотребности щебня  $B_{\text{щ}}$  находят по формуле:

$$B_{\text{щ}} = \frac{(B/\Pi)_{\text{б}} - (B/\Pi)_{\text{п}}}{3,5}, \quad (11.4)$$

где  $(В/Ц)_6$  и  $(В/Ц)_p$  – значения В/Ц равноподвижных бетонной и растворной смесей.

Водопотребность песка колеблется в интервале 4-14 %, щебня (гравия) – 1-10 %.

Одна из важных технологических задач – минимизация водопотребности бетонных смесей без ухудшения показателей их удобоукладываемости решается за счет введения пластифицирующих добавок и оптимизации зернового состава заполнителей, применения цемента с пониженной нормальной густотой.

В.И. Сорокером в СССР и Ф.Р. Макмилланом в США было установлено *правило постоянства водопотребности* (ППВ). Ими было найдено, что при неизменном водосодержании расход цемента в пределах 200-400 кг/м<sup>3</sup> не влияет существенно на удобоукладываемость бетонных смесей.

С физических позиций правило постоянства водопотребности заключается в том, что с увеличением Ц/В до некоторого критического значения рост структурной вязкости цементного теста в бетонной смеси компенсируется увеличением его количества и, соответственно, толщины слоя цементного теста на зернах заполнителя. За пределами критического Ц/В увеличение количества “смазки” уже не компенсирует прогрессивно возрастающую вязкость теста (рис. 11.7).

При поступлении из смесителя бетонная смесь имеет достаточно большое число воздушных пор. Достижение необходимых качественных показателей бетона возможно лишь при тщательном уплотнении бетонных смесей. В среднем на каждый процент воздушных пор приходится 5...6% падения прочности (рис. 11.8). Недоуплотнение отрицательно сказывается и на ряд других свойств затвердевшего бетона.

Степень уплотнения бетонной смеси определяется *коэффициентом уплотнения*:

$$K_y = 1 - П, \quad (11.5)$$

где П – пористость уплотненной смеси.

Формулу (11.5) можно преобразовать, найдя пористость из выражения:

$$П = 1 - \frac{\rho_{\Phi}}{\rho_p}, \quad (11.6)$$

## 11. Композиционные материалы на основе вяжущих веществ

где  $\rho_p$  – расчетное значение плотности бетонной смеси без учета остаточного воздуха;  $\rho_\phi$  – фактическая плотность смеси, достигнутая при уплотнении.

Тогда:

$$K_y = \frac{\rho_\phi}{\rho_p}. \quad (11.7)$$

При уплотнении бетона из подвижных смесей достигается  $K_y \geq 0,98$ , для малоподвижных, жестких и мелкозернистых смесей –  $K_y \geq 0,96$ .

В, л/м

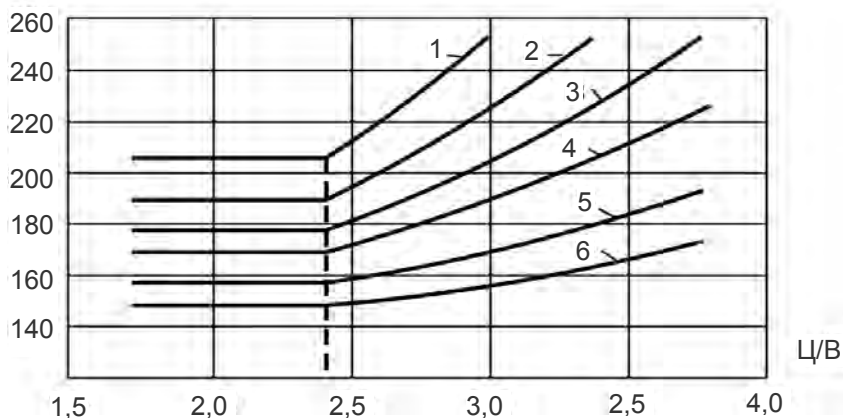


**Рис. 11.7.** Влияние Ц/В на водопотребность бетонной смеси:

1-3 – смеси с осадкой конуса 10, 5, 2 см;

4-6 – смеси с жесткостью 30, 60, 100 с (по техническому вискозиметру), щебень 5-20 мм, песок средней крупности, цемент с нормальной густотой 26-27%)

Основные способы механического воздействия на бетонную смесь с целью ее уплотнения и формирования изделий можно разделить на 3 группы:

- статические (прессование, укатка, вакуумирование);
- динамические (вибрирование, трамбование);
- комбинированные (вибропрессование, вибровакуумирование, виброштампование и др.).

Динамические воздействия при укладке бетонной смеси используются с 1860 г., тогда для уплотнения жестких смесей начали ис-



пользовать трамбование. Вибрирование бетонной смеси при возведении крупных объектов начал применять Э. Фрейсине в 1917 г. Широко в строительстве вибрация как основной способ уплотнения стала применяться с 30-х годов XX столетия.

При статическом уплотнении на бетонную смесь оказывают статические силовые воздействия. При прессующем давлении на бетон, которое может достигать 10-15 МПа и выше получают бетон особо высокой плотности и прочности, однако реализация этого способа сдерживается необходимостью применения сложного и

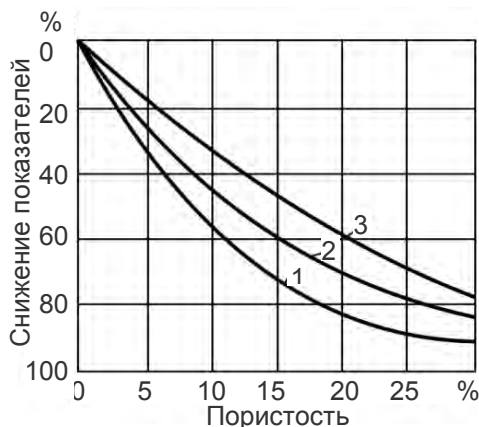


**Рис. 11.8.** Влияние пористости бетонной смеси на прочность при сжатии (1), прочность при растяжении (2), динамический модуль упругости (3)

энергоёмкого оборудования. В технологии получения строительных изделий распространено *вибропрессование*, при котором силовые воздействия не превышают 0,01-0,02 МПа. Пригруз в сочетании с вибрированием позволяет существенно сокращать продолжительность формирования жестких бетонных смесей, улучшает равномерность уплотнения, препятствует расслоению смесей в особенности на легких заполнителях.

К разновидностям вибропрессования можно отнести *виброштампование* и силовой *вибропрокат*. При первом способе вибрационное воздействие и статическое давление создаются одним рабочим органом — виброштампом, при втором вибрирование сочетается с механическим давлением на бетон вибровалков прокатного стана.

При *вибровакuumировании* в бетонной смеси, предварительно уплотненной вибрированием, с помощью вакуумных устройств создается разрежение и, благодаря разности давлений, из бетона отсасывается воздух и избыточная вода.

Из безвибрационных способов уплотнения применяют роlikовое формование, центрифугирование и литьевое формование.

В современных условиях при массовом применении суперпластифицирующих добавок все большее распространение получают укладка и уплотнение литых и самоуплотняющихся бетонных смесей. *Литьевая технология* предполагает применение литых бетонных смесей с ОК = 18-26 см, укладываемых под действием сил гравитации без или с применением непродолжительного виброуплотнения.

**Структура бетона.** Бетон можно представить как сочетание относительно непрерывной “сотовой” структуры цементного камня с втопленными в него заполнителями различных размеров и формы, многочисленными микро- и макропустотами, расположенными в цементном камне, заполнителях и контактах между ними. Для бетона характерен ряд структурных групп. Различают плотную структуру характерную для обычных тяжелых бетонов; структуры с пористым заполнителем – для легких бетонов, ячеистые – для крупнопористых бетонов, газо- и пенобетона (рис. 11.9).

По И.М.Грушко можно выделить три группы структур бетона в зависимости от степени раздвижки зерен заполнителей.

Для структуры с *базальной цементацией* зерна заполнителей не образуют контактов между собой и “плавают” в цементирующей массе. Свойства материала при такой макроструктуре обусловлены преимущественно свойствами матрицы. Заполнители, действуя как концентраторы напряжений, могут ухудшать свойства конгломерата. По мере насыщения структуры зернами заполнителя образуется плотный каркас, склеенный тонкой прослойкой связующего. Такую структуру называют *поровой*. Она благоприятна как с позиций затрат вяжущего, так и придания бетону улучшенных технических свойств. *Контактная* структура характеризуется максимальным насыщением бетона заполнителями, когда количества вяжущего недостаточно для заполнения межзерновых пустот.

Основные свойства бетона зависят от сцепления цементного камня с заполнителями. Взаимодействие цементного камня с заполнителями может быть механическим, физико-химическим, химическим и смешанным. Механическое сцепление достигается наличием на поверхности зерен заполнителя микрорельефа, физико-химическое – обусловлено адгезионными свойствами заполнителя,

химическое – его химической активностью по отношению к продуктам гидратации цемента. Уже на стадии затворения бетонных смесей начинается формирование контактных слоев между цементным камнем и заполнителями. Для плотного примыкания цементного теста к поверхности заполнителя необходимо, чтобы эта поверхность была чистой и гидрофильной. Частичное “точечное” примыкание цементного камня к поверхности заполнителей приводит к уменьшению адгезии.

Оптимальная толщина промежутков между зернами мелкого заполнителя, обеспечивающая сплошность контакта составляет 40-

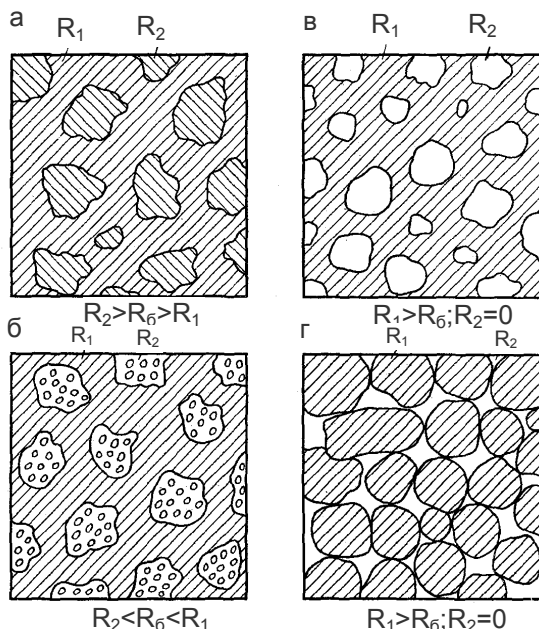


**Рис. 11.9.** Основные типы структуры бетона: а – плотная; б – плотная с ячеистым заполнителем; в – ячеистая; г – зернистая;  $R_6$  – средняя прочность структуры;  $R_1$  и  $R_2$  – прочности составляющих бетонов

100 мкм. Ослабление контактной зоны наблюдается при размещении в ней сравнительно крупных кристаллов  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , а также глины и пыли. При повышенных значениях В/Ц за счет водоотделения при виброуплотнении, седиментации теста и последующей кон-

тракции вокруг зерен крупного заполнителя образуются пустоты и ослабленные зоны.

С увеличением шероховатости поверхности заполнителя прочность бетона средних классов возрастает до 30%, а высоких – до 50%. Адгезия повышается при наличии химического срастания, имеющего место в контактах карбонатных заполнителей с цементным камнем, а также кварцевых заполнителей при автоклавной обработке.

Поверхность зерен заполнителя при твердении бетона играет роль подложки, облегчающей образование кристаллических зародышей. Интенсивность зародышеобразования определяется степенью гидрофильности и адсорбционной способностью поверхности - подложки.

Прочность на отрыв в зоне контакта цементный камень – заполнитель является существенной составляющей прочности бетона. По данным С.С.Гордона она может быть не менее чем в 2 раза больше составляющей, определяемой прочностью цементного камня.

Поры, характерные для бетона, можно разделить на три вида: поры цементного камня, поры заполнителя и контактные поры на поверхности раздела цементного камня и заполнителя.

Общая пористость бетона на плотных заполнителях как отношение объема пор к общему объему бетона описывается уравнением:

$$\Pi_{об} = \frac{(B - 0,23\alpha Ц) + (1 - \delta)1000}{1000}, \quad (11.8)$$

где В и Ц – соответственно расходы воды и цемента, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – степень гидратации цемента;  $\delta$  – структурная плотность бетонной смеси, рассчитываемая как суммарная объемная концентрация ( $\varphi_i$ ) всех компонентов.

$$\delta = \sum \varphi_i = \sum \frac{m_i}{\rho_{o,i}}, \quad (11.9)$$

где  $m_i$  и  $\rho_{o,i}$  – соответственно, масса и средняя плотность  $i$ -того компонента бетонной смеси.

При введении в бетонную смесь микропенообразующих ПАВ в нем образуется система условно замкнутых пор, заполненных воздухом. Поры от вовлеченного воздуха имеют размеры порядка 0,05 см, что значительно меньше, чем от случайно защемленного воздуха. Основным контролируемым фактором для системы условно

замкнутых пор является расстояние, между пузырьками воздуха, которое составляет обычно около 0,025 см. Содержание вовлеченного добавками ПВА воздуха в бетоне, как правило, находится в диапазоне 3-6%.

Кроме пор важными структурными элементами бетона, определяющими его физико-механические свойства, являются *трещины* – несплошности материала, имеющие внутренние поверхности раздела. В реальном материале всегда имеется большое количество микротрещин, возникающих по технологическим или эксплуатационным причинам. Эксплуатационные трещины в бетоне возникают при его работе под нагрузкой и воздействии агрессивных факторов окружающей среды. Причинами образования технологических трещин являются процессы и явления, протекающие при формировании цементного камня, взаимодействии матричного материала и заполнителей, деформационные процессы. Количество и вид технологических трещин оказывают существенное влияние на физико-механические характеристики бетона, кинетику накопления и развития эксплуатационных трещин, несущую способность и характер разрушения конструкций. Самозалечивание технологических трещин возможно при зарастании их объемами продуктами гидратации или в результате воздействия среды, например при карбонизации. Количество технологических трещин уменьшается при введении различных модификаторов структуры, оптимизации технологических процессов.

**Прочность бетона.** Основной качественной характеристикой бетона является прочность, характеризуемая пределом прочности – граничным напряжением, при котором материал разрушается.

При проектировании бетонных и железобетонных конструкций в зависимости от их назначения устанавливают *классы бетона* по прочности на сжатие ( $B$ ), осевое растяжение ( $B_t$ ) и растяжение при изгибе ( $B_{из}$ ). Под классом бетона по прочности понимают нормативную кубиковую прочность  $R_0^H$ , МПа, задаваемую с обеспеченностью 0,95 и определяемую по формуле:

$$R_0^H = \bar{R}(1 - 1,64C_v), \quad (11.10)$$

где  $C_v$  – коэффициент вариации прочности бетона;  $\bar{R}$  – среднее значение прочности, полученное при испытании образцов-кубов с ребром 150 мм.

При переходе от класса бетона к его средней прочности и марке при нормативном коэффициенте вариации 13,5% (0,135) можно использовать формулу:

$$\bar{R} = B / 0,778. \quad (11.11)$$

Коэффициент вариации прочности находят по формуле:

$$C_V = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(R_i - R_m)^2}{n-1}}}{R_m}, \quad (11.12)$$

где  $R_i$  – фактическая прочность бетона, определяемая по результатам испытания контрольных образцов;  $R_m$  – среднеарифметическая прочность бетона всех серий контрольных образцов одного возраста за анализируемый период;  $n$  – количество серий контрольных образцов.

Ведущий прочностной параметр бетона – прочность при сжатии связан корреляционными зависимостями с прочностью при растяжении, срезе, скалывании и др. (табл. 11.9).

Таблица 11.9

Некоторые расчетные формулы свойств бетона, однозначно связанных с прочностью при сжатии

| Нормируемое свойство бетона                              | Расчетная формула                 |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Прочность бетона на растяжение при изгибе, $R_{p,и}$     | $R_{p,и} = 0,08(10R_{сж})^{2/3}$  |
| Прочность бетона на растяжение при скалывании, $R_{p,р}$ | $R_{p,р} = 0,055(10R_{сж})^{2/3}$ |
| Прочность бетона при осевом растяжении, $R_{o,р}$        | $R_{o,р} = 0,046(10R_{сж})^{2/3}$ |
| Прочность бетона при срезе, $R_{ср}$                     | $R_{ср} = 0,093(10R_{сж})^{2/3}$  |
| Прочность бетона при скалывании, $R_{ск}$                | $R_{ск} = 0,162(10R_{сж})^{2/3}$  |

**Примечания. 1.** Прочностные показатели приведены в МПа. **2.** Зависимости, приведенные в табл. 11.8, являются усредненными.

Основной стандартный показатель прочности бетона при сжатии – т.н. *кубиковая прочность* ( $R_6$ ) учитывается при проектировании составов бетонных смесей и текущем производственном контроле.

Прочность бетона при сжатии в конструкциях моделируется *призменной прочностью* ( $R_{пр}$ ), которая учитывается в конструктивных расчетах и пропорциональна кубиковой. На основании опытных данных установлено, что для тяжелых и легких бетонов призменная прочность колеблется от  $0,78R_b$  для бетонов высоких классов до  $0,83R_b$  для бетонов низких классов.

Статистическая обработка большого массива экспериментальных данных показала, что в среднем  $R_{пр} = 0,783R_b$ .

Стандартное определение прочности бетона состоит в измерении минимальных усилий, разрушающих специально изготовленные контрольные образцы бетона при их статическом нагружении с постоянной скоростью роста нагрузки, и последующем вычислении напряжений при этих усилиях.

Разрушение бетона обусловлено зарождением, формированием и распространением микротрещин. При сжатии образование трещин соответствует нагрузке равной 50-60% от разрушающей, при растяжении – около 80%. Вследствие образования микротрещин происходит перераспределение напряжений в структуре бетона, что способствует дальнейшей концентрации напряжений и ускорению процесса разрушения. При разрушении бетона достигают предельных значений его деформации. Прочность при сжатии определяется предельной растяжимостью бетона в направлении нормальном к действию силы, а прочность на растяжение – в направлении действия силы.

Существует ряд феноменологических, статистических и структурных теорий прочности бетона.

С позиций решения технологических задач наиболее перспективны *структурные теории прочности*, базирующиеся на определенных моделях строения бетона. Основная исходная посылка структурных теорий заключается в том, что бетон представляет собой неоднородное гетерогенное тело.

Р. Фере в 1892 г., основываясь на структурных представлениях, впервые предложил зависимость прочности бетона от параметра, пропорционального относительной плотности цементного камня:

$$R_{сж} = k \left( \frac{V_{ц}}{V_{ц} + V_B + V_B} \right)^2, \quad (11.13)$$

## 11. Композиционные материалы на основе вяжущих веществ

где  $V_{\text{ц}}$ ,  $V_{\text{в}}$ ,  $V_{\text{в}}$  – абсолютные объемы цемента, воды и воздуха;  $k$  – коэффициент, зависящий от качества цемента, продолжительности и режима твердения.

Критерий Фере не учитывал изменение структуры цементного камня по мере гидратации, что позволило Пауэрсу в дальнейшем его видоизменить и представить как концентрацию твердых продуктов гидратации цемента в пространстве, доступном для этих веществ (отношением объема “геля” к суммарному объему “геля” и пустот):

$$X = \frac{k_{\text{г}} V_{\text{у.ц}} \alpha}{V_{\text{у.ц}} \alpha + B / \text{Ц}} \approx \frac{0.647 \alpha}{0.319 \alpha + B / \text{Ц}}, \quad (11.14)$$

где  $k_{\text{г}} = 2.09 \dots 2.2$  – коэффициент увеличения объема продуктов гидратации;  $V_{\text{у.ц}}$  – удельный объем цемента ( $V_{\text{у.ц}} = 1/\rho_{\text{ц}} = 0.319 \text{ см}^3/\text{г}$ ), величина обратная плотности цемента;  $\alpha$  – часть цемента, прошедшая гидратацию.

Близкие к критерию Пауэрса критерии прочности цементного камня были затем предложены в ряде других работ.

Формула Фере стала исходной для проектирования составов бетона с заданной прочностью.

Важнейшим положением структурной теории бетона является закон (правило) водоцементного отношения вытекающий из общей для твердых тел зависимости прочности от их пористости или относительной плотности.

Расчетное определение состава бетона с заданной прочностью стало возможным после установления Д. Абрамсом в 1919 г. закона (правила) водоцементного отношения. В соответствии с этим законом прочность бетона, приготовленного на одних и тех же исходных материалах, не зависит от состава бетона и определяется только водоцементным отношением. Обработав результаты более чем 50 тысяч испытаний, Д. Абрамс предложил эмпирическую формулу:

$$R_{\infty} = \frac{k}{A^x}, \quad (11.15)$$

где  $k$  – коэффициент прочности,  $A$  – постоянный коэффициент,  $x$  – отношение объема воды к объему цемента, насыпная плотность которого принята равной  $1500 \text{ кг/м}^3$ .



Уточняя для практических расчетов зависимость Д. Абрамса, Р. Граф и Н.М. Беляев предложили в конце 20-х годов прошлого столетия формулы прочности бетона типа:

$$R_6 = \frac{R_{ц}}{A(B/\Pi)^n}, \quad (11.16)$$

где  $A$  и  $n$  – коэффициенты (по Графу  $A=4\dots8$ ,  $n=2$ , по Беляеву  $A=3,5\dots4$   $n=1,5$ ),  $R_{ц}$  – активность цемента, характеризующая его прочностью при сжатии в 28 сут. нормального твердения.

Графически формулу (11.16) можно представить семейством гиперболических кривых (рис. 11.10).

Примерно в это же время, когда были предложены зависимости Р.Графа и Н.М. Беляева, швейцарский исследователь М. Боломей, основываясь на зависимости Р. Фере, обосновал формулу, ставшую исходной для семейства удобных для практики линейных зависимостей  $R_6 = f(\Pi / B)$ , где  $\Pi/B$  – цементноводное отношение:

$$R_6 = K(\Pi/B - 0,5). \quad (11.17)$$

Формулы  $R_6 = f(B/\Pi)$ , отражая примерно гиперболический характер изменения прочности бетона с изменением  $B/\Pi$  (рис. 11.10), и форму-

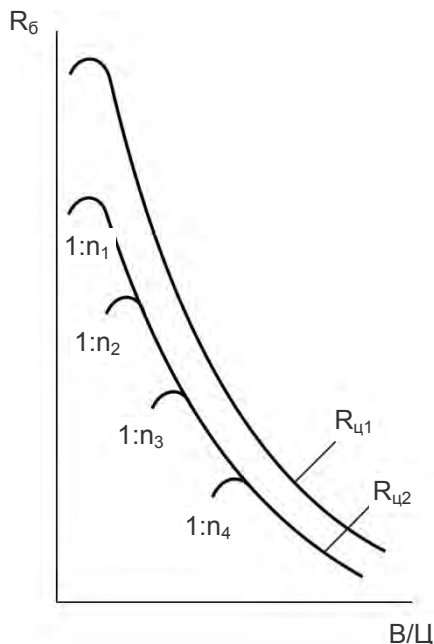


**Рис. 11.10.** Зависимость прочности бетона от  $B/\Pi$  и  $R_{ц}$ :  $1:n_i$  – отношение массы цемента к массе заполнителя;  $R_{ц1} > R_{ц2}$

лы  $R_6 = f(\Pi/B)$ , описывающие линейное изменение прочности с изменением  $\Pi/B$ , по сути близки между собой. Действительно, геометрическим свойством гиперболы  $y=k/X$ , является способность в координатах  $y$  и  $1/X$  выражаться прямой линией.

После обработки результатов обширных экспериментальных исследований Б.Г. Скрамтаев и Ю.М. Баженов предложили зависимо-

сти для прочности бетона, отражающие линейное влияние на прочность активности цемента ( $R_{ц}$ ) и "кусочно-линейный" характер влияния Ц/В (рис. 11.11):

$$\text{при } Ц/В \geq 2,5 \quad R_6 = A R_{ц} (Ц/В - 0,5), \quad (11.18)$$

$$\text{при } Ц/В \leq 2,5 \quad R_6 = A_1 R_{ц} (Ц/В + 0,5). \quad (11.19)$$

где коэффициенты  $A$  и  $A_1$  зависят от качества исходных материалов. Для высококачественных материалов, используемых при изготовлении бетона,  $A$  и  $A_1$  соответственно равны 0,65 и 0,43, рядовых – 0,6 и 0,4, пониженного качества – 0,55 и 0,37.

Приведенные формулы справедливы для бетонов из умеренно жестких и подвижных бетонных смесей, уложенных вибрацией, при коэффициенте уплотнения не ниже 0,98.

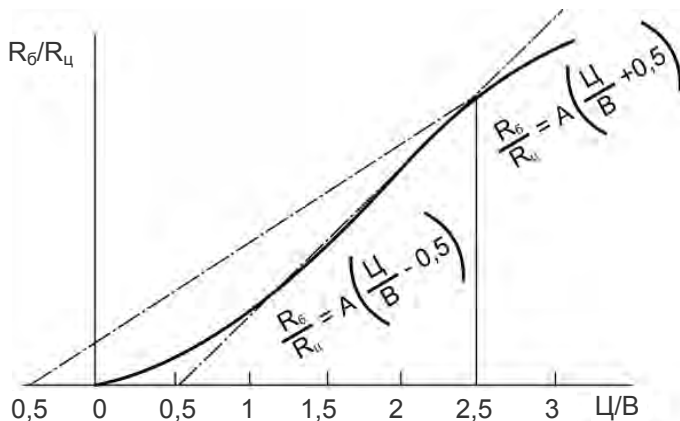


**Рис. 11.11.** Зависимость прочности бетона от Ц/В

Зависимость прочности бетона от Ц/В строго соблюдается лишь при прочих "равных условиях". Многие исследования показали влияние на прочность наряду с Ц/В удобоукладываемости бетонной смеси, объемной концентрации цементного камня и ряда других факторов. По данным Ю.М. Баженова действительная прочность может отличаться от расчетной в 1,3-1,5 раза. Составы с большим расходом цемента при тех же одинаковых значениях В/Ц характеризуются, как правило, меньшей прочностью и наоборот, более "тощие", но достаточно уплотненные бетоны имеют повышенную прочность. Важную роль играют также крупность, водопоглощение,

характер поверхности заполнителей, время с момента их дробления и другие факторы.

Для практических расчетов при прогнозировании прочности и проектировании составов тяжелых и легких бетонов может использоваться "приведенное" Ц/В:

$$(\text{Ц}/\text{В})_{\text{пр}} = \frac{\text{Ц} + K_{\text{ц.э}} \text{Д}}{\text{В} + \Pi_3 \text{V}_3 + \text{V}_{\text{вх}}}, \quad (11.20)$$

где  $K_{\text{ц.э}}$  – коэффициент “цементирующей эффективности” или “цементный эквивалент” 1 кг добавки (Д) вводимой в бетонную смесь для экономии цемента;  $\Pi_3$  – пористость заполнителя;  $\text{V}_{\text{вх}}$  – объем вовлеченного воздуха.

Переход от “приведенного” к фактическому Ц/В можно осуществить по формуле:

$$\text{Ц}/\text{В} = (\text{Ц}/\text{В})_{\text{пр}} - \frac{K_{\text{ц.э}} \text{Д}}{\text{В} + \text{V}_{\text{вх}}}. \quad (11.21)$$

Знание необходимого цементно–водного отношения и расхода воды позволяет легко рассчитать требуемый расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси:

$$\text{Ц} = \text{В} \cdot (\text{Ц}/\text{В}). \quad (11.22)$$

Одной из основных задач оптимизации составов бетона является определение соотношения заполнителей, обеспечивающего минимальный расход цемента. В бетоне с заданными показателями прочности и удобоукладываемости выбор соотношения мелкого и крупного заполнителей основан на правиле оптимального содержания песка, в соответствии с которым при заданном расходе цементного теста бетонная смесь имеет наилучшую удобоукладываемость или соответственно наименьшую водопотребность только при определенном расходе песка (рис. 11.12).

Зная необходимые объемы цементного теста ( $\text{V}_{\text{ц.т}}$ ) и вовлеченного воздуха ( $\text{V}_{\text{вх}}$ ), можно легко определить абсолютный объем смеси заполнителей ( $\text{V}_3$ ) ( $\text{V}_3 = 1000 - \text{Ц}/\rho_{\text{ц}} - \text{В}/\rho_{\text{в}} - \text{V}_{\text{вх}}$ ), а затем требуемые расходы мелкого и крупного заполнителей:

$$\text{V}_{\text{п}} = \text{V}_3 \cdot r; \text{V}_{\text{к}} = \text{V}_3 - \text{V}_{\text{п}}, \quad (11.23)$$

где  $r$  – объемная доля мелкого заполнителя в смеси мелкого и крупного заполнителей.

Величину  $r$  находят обычно экспериментально или на основе справочных рекомендаций.

Расходы мелкого (П) и крупного (Щ) заполнителей по массе:

$$\Pi = V_n \rho_n; \quad \text{Щ} = V_{\text{щ}} \rho_{\text{щ}}. \quad (11.24)$$

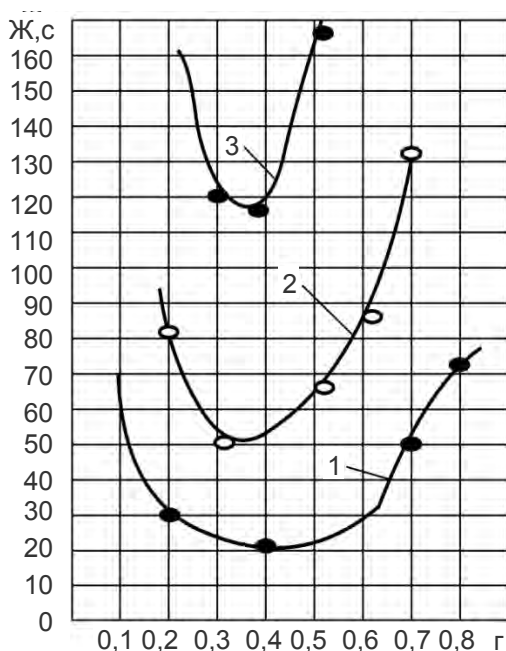


**Рис. 11.12.** Влияние доли песка в смеси заполнителей на удобоукладываемость бетонной смеси (по О.А. Гершбергу):

- 1) номинальный состав 1:1 (цемент : смесь мелкого и крупного заполнителя); 2) то же, 1 : 1,5; 3) то же, 1 : 2

В широко применяемых расчетно-экспериментальных методах проектирования составов бетона для определения расходов песка и щебня распространено использование коэффициента заполнения пустот и раздвижки зерен щебня (гравия) цементно-песчаным раствором –  $\alpha$ . Этот коэффициент (*коэффициент раздвижки*) справедлив при допущении, что бетонную смесь можно представить как двухфазную систему, состоящую из крупного заполнителя в стандартном насыпном состоянии и цементно-песчаного раствора.

Расходы крупного и мелкого заполнителей можно легко найти решением системы двух уравнений

материального баланса. Первое уравнение в системе (11.25) постулирует равенство абсолютного объема бетонной смеси сумме абсолютных объемов входящих в нее компонентов, второе – соответствие объема цементно-песчаного раствора объему пустот крупного заполнителя с учетом необходимой раздвижки для обеспечения требуемой удобоукладываемости смеси:

$$\frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + \frac{B}{\rho_B} + \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} = 1000 \quad (11.25)$$

$$\frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + \frac{B}{\rho_B} + \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} = \alpha P_{\Pi} \frac{\Pi}{\rho_{\Pi, \Pi}},$$

где  $\rho_{\Pi}$ ,  $\rho_B$ ,  $\rho_{\Pi}$  и  $\rho_{\Pi}$  – истинные плотности соответственно цемента, воды, мелкого и крупного заполнителей, кг/л;  $P_{\Pi}$  – пустотность крупного заполнителя,  $\rho_{\Pi, \Pi}$  – его насыпная плотность, кг/л.

Откуда:

$$\Pi = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{\Pi}} + \frac{\alpha}{\rho_{\Pi, \Pi}}}, \quad (11.26)$$

$$\Pi = (1000 - \Pi / \rho_{\Pi} - B / \rho_B - \Pi / \rho_{\Pi}) \rho_{\Pi}. \quad (11.27)$$

Коэффициент раздвижки  $\alpha$  определяют по справочным данным (табл. 11.10).

При решении системы уравнений (11.25) может при необходимости учитываться также находящийся в бетонной смеси воздух.

Таблица 11.10

Коэффициент раздвижки (для пластичных бетонных смесей)

| Расход цемента,<br>кг/м <sup>3</sup> | Значения $\alpha$ при В/Ц |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|---------------------------|------|------|------|------|------|
|                                      | 0,3                       | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  |
| 250                                  | –                         | –    | –    | 1,26 | 1,32 | 1,38 |
| 300                                  | –                         | –    | 1,3  | 1,36 | 1,42 | –    |
| 350                                  | –                         | 1,32 | 1,38 | 1,44 | –    | –    |
| 400                                  | 1,31                      | 1,4  | 1,45 | –    | –    | –    |
| 500                                  | 1,44                      | 1,52 | –    | –    | –    | –    |
| 600                                  | 1,52                      | 1,56 | –    | –    | –    | –    |

**Примечания.** 1. Таблица составлена для песков с водопотребностью  $W_{п}=7\%$ . При увеличении  $W_{п}$  на каждый процент  $\alpha$  уменьшается на 0,03, а при снижении  $W_{п}$  возрастает соответственно на 0,03. 2. Для жестких бетонных смесей ( $\Pi < 400$  кг/м<sup>3</sup>)  $\alpha = 1,05-1,15$ .

Развитие бетоноведения, компьютеризация технологических и технико-экономических расчетов представили новые возможности для развития расчетного метода проектирования составов бетонов.

Расчетные составы бетонных смесей требуют экспериментального уточнения до их производственного использования, тем не менее применение расчетного метода оказывается целесообразным особенно при необходимости оперативного обоснования потребности ресурсов и эффективности исходных материалов, снижения трудоемкости лабораторных подборов составов.

Изменение прочности бетона во времени так же как изменение его других технических свойств зависит от минералогического и вещественного состава цемента, структуры и состава бетона, условий его твердения.

Повышение прочности бетона во времени обусловлено снижением его пористости, увеличением степени гидратации цемента и прохождением ряда процессов, приводящих к увеличению как когезии частичек цемента между собой, так и адгезии их к заполнителям бетона.

При благоприятных температурно-влажностных условиях прочность бетона растет в течение многих лет (рис. 11.13). При этом интенсивность роста прочности бетона существенно отличается для бетонов на цементах различных групп по химико-минералогическому составу. Наиболее интенсивное нарастание прочности после месячного возраста обнаруживают бетоны на белитовых портландцементях, значительно менее интенсивно нарастание поздней прочности у бетонов на алитовых цементах и наименьший прирост прочности показывают бетоны на алюминатных цементах.

Для ориентировочного прогнозирования роста прочности бетона во времени может быть использовано линейное отношение между прочностью  $R_n$  и логарифмом длительности твердения  $n$  при  $n \geq 3$  сут. и  $t = 15-20^\circ\text{C}$ :

$$R_n = R_{28} \frac{\lg n}{\lg 28}. \quad (11.28)$$

Расчетные коэффициенты роста прочности бетона, полученные по формуле (11.28), приведены ниже:

|              |      |      |      |     |      |      |      |
|--------------|------|------|------|-----|------|------|------|
| сутки        | 3    | 7    | 14   | 28  | 90   | 180  | 365  |
| коэффициенты | 0,33 | 0,58 | 0,79 | 1,0 | 1,35 | 1,56 | 1,77 |

А.В.Саталкин, основываясь на логарифмическом законе нарастания прочности бетона, предложил его модифицировать и учитывать два значения прочности бетона  $R_{n_1}$  и  $R_{n_2}$  в два срока твердения:

$$R_n = R_{n_1} + \frac{(R_{n_2} - R_{n_1}) (\lg n - \lg n_1)}{\lg n_2 - \lg n_1}. \quad (11.29)$$

В формуле (11.29) устраняется допущение, что прочность бетона в возрасте одних суток равна нулю ( $\lg 1 = 0$ ) и представляется возможность косвенно учесть влияние особенностей цемента и других факторов на скорость твердения бетона.

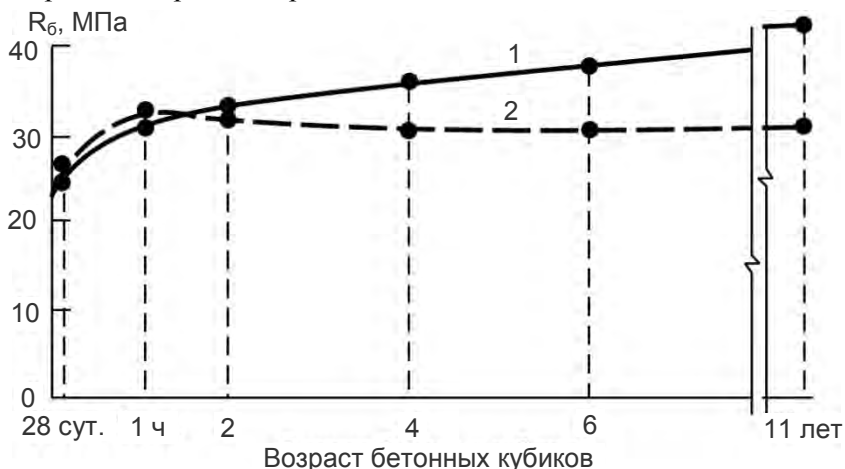


**Рис. 11.13.** Нарастание прочности бетона во времени во влажной (1) и сухой (2) средах

Для бетонов на современных цементах логарифмическая зависимость дает, как правило, заниженные показатели прочности для начальных сроков твердения (до 28 сут.) и завышенные для поздних сроков твердения.

Для предварительных расчетов изменения прочности бетона со временем возможно использование обобщенных эмпирических коэффициентов, дифференцированных для различных цементов (табл. 11.11).

Рост прочности бетона в значительной мере определяется температурно-влажностными условиями твердения. Достаточная влажность бетона необходима для нормального протекания процессов гидратации и структурообразования.

Таблица 11.11

**Коэффициенты нарастания прочности бетона  
на различных цементах**

| Вид цемента                   | Коэффициент прочности бетона в возрасте, сут |      |             |           |
|-------------------------------|----------------------------------------------|------|-------------|-----------|
|                               | 7                                            | 28   | 90          | 180       |
| Портландцементы:              |                                              |      |             |           |
| Алитовые                      | 0,65-0,75                                    | 1,00 | 1,10-1,25   | 1,30-1,40 |
| Обычные                       | 0,60-0,70                                    | 1,0  | 1,15...1,35 | 1,30-1,50 |
| Белитовые                     | 0,55-0,65                                    | 1,00 | 1,30-1,40   | 1,45-1,60 |
| Шлакопортландцементы на:      |                                              |      |             |           |
| кислых шлаках                 | 0,40-0,50                                    | 1,00 | 1,40-1,65   | 1,60-2,00 |
| основных шлаках               | 0,40-0,50                                    | 1,00 | 1,35-1,65   | 1,55-1,90 |
| Пуццолановые портландцементы: |                                              |      |             |           |
| с добавкой туфа               | 0,50-0,60                                    | 1,00 | 1,45-1,75   | 1,55-1,90 |
| с добавкой опоки              | 0,50-0,60                                    | 1,00 | 1,25-1,55   | 1,40-1,65 |

С понижением температуры и особенно приближением ее к 0°C твердение бетона резко замедляется, что особенно значительно сказывается в раннем возрасте. Средние значения скорости нарастания прочности бетона при изменении температуры от 40 до -3°C приведены по данным С.А. Миронова в табл. 11.12.

Таблица 11.12

**Средние значения скорости нарастания прочности бетона, %**

| №<br>п/п | Возраст<br>бетона, сут | Средняя температура бетона в конструкции, °С |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |
|----------|------------------------|----------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
|          |                        | -3                                           |    | 0  |    | 5  |    | 10 |    | 20  |     | 40  |     |
|          |                        | Цемент                                       |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |
|          |                        | Б                                            | В  | Б  | В  | Б  | В  | Б  | В  | Б   | В   | Б   | В   |
| 1        | 1/2                    | -                                            | -  | 2  | 2  | 4  | 4  | 6  | 6  | 10  | 14  | 25  | 30  |
| 2        | 1                      | 2                                            | 4  | 5  | 6  | 9  | 12 | 12 | 14 | 22  | 28  | 53  | 55  |
| 3        | 3                      | 8                                            | 10 | 18 | 22 | 25 | 32 | 35 | 40 | 50  | 60  | 85  | 90  |
| 4        | 5                      | 14                                           | 17 | 28 | 35 | 38 | 46 | 50 | 55 | 65  | 70  | 98  | 98  |
| 5        | 7                      | 18                                           | 20 | 37 | 43 | 48 | 53 | 56 | 60 | 75  | 80  | 100 | 102 |
| 6        | 14                     | 20                                           | 25 | 51 | 59 | 67 | 72 | 72 | 80 | 87  | 92  | -   | -   |
| 7        | 28                     | 25                                           | 30 | 70 | 75 | 84 | 85 | 93 | 93 | 100 | 100 |     |     |

**Примечания.** Б – цемент с содержанием  $C_3A < 6\%$ , В – с содержанием  $C_3A > 6\%$ .

Темп роста прочности зависит от вида и марки цемента, класса бетона.



Температура замерзания воды в бетоне зависит от радиуса пор, в которых она находится. Основная масса льда образуется при понижении температуры до  $-5...-10^{\circ}\text{C}$ . В этом диапазоне температур идет интенсивное льдообразование за счет замерзания механически связанной воды, содержащейся в макропорах радиусом более  $0,1\text{ мкм}$ . При дальнейшем понижении температуры от  $-10$  до  $-40^{\circ}\text{C}$  количество замерзающей воды увеличивается незначительно за счет замерзания ее в капиллярах радиусом менее  $0,1\text{ мкм}$ .

Большое влияние на льдистость оказывает продолжительность твердения бетона до начала замерзания и водоцементное отношение. Наибольшие разрушения в структуре бетона наблюдаются при замерзании воды в порах радиусом  $0,1-1\text{ мкм}$ .

Твердение бетона на морозе обусловлено возможностью прохождения процесса гидратации и тепловыделения цемента. Часть воды при отрицательных температурах остается в жидкой фазе, поэтому твердение бетона продолжается, хотя и очень медленно. При температурах ниже  $0^{\circ}\text{C}$  гидратация цемента протекает с убывающей интенсивностью и при  $-10^{\circ}\text{C}$  практически прекращается.

Задача любого способа зимнего бетонирования заключается в предохранении бетона от замерзания до приобретения им *критической прочности*, обеспечивающей необходимое сопротивление давлению льда. Твердение бетона в течение необходимого срока до замораживания обеспечивается за счет использования собственной экзотермии и при дополнительной подаче тепла извне. Часто оба направления комбинируются для достижения необходимого эффекта. Критическая прочность, после достижения которой замораживание не наносит существенного вреда формирующейся структуре, для бетона классов В7,5 и В12 составляет не менее 50% проектной, В15 и В25 – не менее 40%, В30 и В40 – не менее 30%.

На сохранение и использование экзотермии бетона направлен *способ термоса*, т.е. твердения бетона в условиях тепловой изоляции, этот способ наиболее эффективный при бетонировании массивных конструкций и подземных сооружений. Для повышения внутреннего запаса тепла в бетоне подогревают воду

затворения, а в некоторых случаях и другие исходные материалы, разогревают бетонную смесь электрическим током.

Наиболее распространенным способом внешнего обогрева бетона при зимнем бетонировании является *электротермообработка* монолитных конструкций. Разработаны и применяются на практике электродный прогрев в т.ч. предварительный электроразогрев бетонных смесей; нагрев в электромагнитном поле (индукционный); обогрев различными электронагревательными устройствами (контактный, конвекционный, в том числе инфракрасным излучением).

Эффективным способом обеспечения твердения бетона при отрицательных температурах является введение химических добавок - электролитов.

При введении химических добавок, понижающих точку замерзания жидкой фазы, гидратация и тепловыделение цемента происходят при более низких отрицательных температурах, что широко используется в практике зимнего бетонирования. Добавление, например, безводного хлорида кальция в количестве 1-7% воды затворения снижает температуру замерзания на 0,4-3,4°C.

Бетоны с противоморозными добавками применяют при условии набора ими критической прочности до замерзания не менее 5 МПа, а при повышенных требованиях к морозостойкости и водонепроницаемости – не менее 50% проектной прочности. Концентрация добавок, растворяемых в воде затворения, выбирается в зависимости от средней расчетной температуры твердения. Она может колебаться для разных добавок от 3 до 10% и более от массы цемента.

Усредненные данные, отражающие нарастание прочности бетона с основными противоморозными добавками при отрицательных температурах приведены в табл. 11.13.

При выборе добавок учитывают их коррозионную активность по отношению к арматуре. Добавки хлоридов не допускается применять для железобетонных конструкций. Добавка нитрита натрия, обладая антифризным действием, одновременно является ингибитором коррозии арматуры и ее можно применять практически без ограничений в железобетонных конструкциях (не применяют эту добавку лишь в тех случаях,

когда в заполнителе имеются включения реакционно-способного кремнезема).

Таблица 11.13

Наращение прочности бетона на портландцементе  
с противоморозными добавками

| Добавка         | Температура<br>твердения<br>бетона, °С | Прочность при сжатии, % мароч-<br>ной, при твердении на морозе, сут |    |    |     |
|-----------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----|----|-----|
|                 |                                        | 7                                                                   | 14 | 28 | 90  |
| ХК+ХН           | -5                                     | 35                                                                  | 65 | 80 | 100 |
|                 | -10                                    | 25                                                                  | 35 | 45 | 70  |
|                 | -15                                    | 15                                                                  | 25 | 35 | 50  |
|                 | -20                                    | 10                                                                  | 15 | 20 | 40  |
| ХК+НН           | -5                                     | 40                                                                  | 60 | 90 | 105 |
|                 | -10                                    | 25                                                                  | 40 | 65 | 90  |
|                 | -15                                    | 20                                                                  | 35 | 45 | 70  |
|                 | -20                                    | 15                                                                  | 30 | 40 | 60  |
|                 | -25                                    | 10                                                                  | 15 | 25 | 40  |
| ННХК,<br>ННХК+М | -5                                     | 50                                                                  | 70 | 95 | 105 |
|                 | -10                                    | 30                                                                  | 45 | 70 | 90  |
|                 | -15                                    | 20                                                                  | 35 | 45 | 70  |
|                 | -20                                    | 15                                                                  | 30 | 40 | 60  |
|                 | -25                                    | 10                                                                  | 15 | 25 | 40  |
| Поташ           | -5                                     | 50                                                                  | 65 | 75 | 100 |
|                 | -10                                    | 30                                                                  | 50 | 70 | 90  |
|                 | -15                                    | 25                                                                  | 40 | 65 | 80  |
|                 | -20                                    | 20                                                                  | 35 | 55 | 70  |
|                 | -25                                    | 15                                                                  | 30 | 50 | 60  |

**Примечание.** Противоморозные добавки: ХН – хлорид натрия; ХК – хлорид кальция; НН – нитрит натрия; ННК – нитрит-нитрат кальция; М – мочевины; НК – нитрит кальция; НКМ – нитрат кальция с мочевиной; ННХК – нитрит-нитрат-хлорид кальция.

Повышение температуры при твердении ускоряет химические реакции гидратации, что положительно влияет на рост прочности бетона (табл. 11.14; рис. 11.14). Однако при недостатке воды в бетоне воздействие повышенных температур замедляет процесс гидратации, снижает прочность бетонов. При полном испарении воды процесс твердения прекращается. Положительное влияние повышенных температур на скорость твердения бетонов послужило ос-

## 11. Композиционные материалы на основе вяжущих веществ

новой разработки и широкого применения в технологии железобетонных конструкций *тепловлажностной обработки*. Бетон нагревают с помощью пара, электроэнергии, инфракрасных лучей и др. При температурах более 100°C тепловлажностную обработку ведут в автоклавах и специальных герметичных формах.

Таблица 11.14

Рост прочности тяжелого бетона после тепловой обработки

| Класс бетона | Ц/В     | Общий цикл тепловой обработки, час. | Прочность бетона, % от 28-суточной, после окончания тепловой обработки при 80°C через, час. |       |       |       |
|--------------|---------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
|              |         |                                     | 0,5                                                                                         | 4     | 12    | 24    |
| В15          | 1,5-1,3 | 5                                   | 20-30                                                                                       | 30-40 | 34-44 | 38-48 |
|              |         | 7                                   | 33-43                                                                                       | 40-50 | 43-53 | 48-58 |
|              |         | 9                                   | 41-51                                                                                       | 47-57 | 50-60 | 55-65 |
|              |         | 11                                  | 47-57                                                                                       | 52-62 | 55-65 | 60-70 |
|              |         | 13                                  | 52-62                                                                                       | 56-66 | 60-70 | 62-72 |
|              |         | 16                                  | 55-65                                                                                       | 58-68 | 62-72 | 63-74 |
|              |         | 20                                  | 57-67                                                                                       | 60-70 | 63-73 | 65-75 |
| В25          | 2-1,7   | 5                                   | 28-38                                                                                       | 35-45 | 38-48 | 41-51 |
|              |         | 7                                   | 38-48                                                                                       | 45-55 | 48-58 | 50-60 |
|              |         | 9                                   | 47-57                                                                                       | 52-62 | 55-65 | 58-68 |
|              |         | 11                                  | 52-62                                                                                       | 57-67 | 60-70 | 63-73 |
|              |         | 13                                  | 56-66                                                                                       | 60-70 | 64-74 | 66-76 |
|              |         | 16                                  | 60-70                                                                                       | 63-73 | 66-76 | 68-78 |
|              |         | 20                                  | 62-72                                                                                       | 65-75 | 68-78 | 70-80 |

Для получения долговечного бетона важно свести к минимуму его деформации при температурном воздействии. Остаточные деформации имеют место при недостаточном предварительном выдерживании бетона до тепловой обработки, повышенной скорости подъема температуры и ее снижения после отключения подачи пара.

Оптимальная температура пропаривания бетонов на портландцементе 80-85°C, более высокая температура приводит к снижению конечной прочности, особенно ошутимое для бетонов из подвижных смесей с повышенным В/Ц. Для бетонов на композиционных цементах оптимальная температура пропаривания повышается до 95-100°C.

Эффективным технологическим приемом регулирования выхода прочности бетонов при  $C/V = \text{const}$  является введение в бетонную смесь добавок ускорителей твердения.

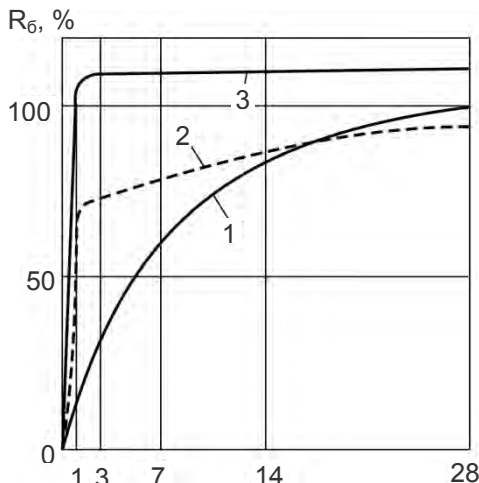


**Рис. 11.14.** Рост прочности бетона во времени: 1 – нормальные условия твердения; 2 – пропаривание при атмосферном давлении и температуре 80°C; 3 – запаривание в автоклаве

Для современного производства бетонных и железобетонных изделий актуальным является максимально возможное снижение энергозатрат.

Основным видом тепловых агрегатов в производстве железобетона являются пока ямные пропарочные камеры, коэффициент полезного действия которых составляет всего около 30%. Потери теплоты снижают, повышая тепловое сопротивление пропарочных камер и уменьшая тепловую емкость ограждений с помощью различных теплоизоляционных материалов и легких бетонов. Более экономичны по сравнению

с ямными вертикальные, туннельные, щелевые и малонапорные камеры. В последних, например, расход пара на 30-40% ниже, чем в ямных.

Наряду с уменьшением теплотерь важнейшее значение для экономии топливно-энергетических ресурсов приобретает развитие *энергосберегающих технологий*: применение высокопрочных и быстротвердеющих цементов, введение химических добавок, снижение температуры и продолжительности нагрева, нагрев бетона электричеством и в среде продуктов сгорания природного газа, применение безобогревных методов и т.д.

**Деформативные свойства.** Величина деформаций бетона и твердения конструкций обуславливают объемно-напряженное состояние бетона и зависят от особенностей нагружения бетона в кон-

структурах и сооружениях, его структуры и состава, свойств отдельных компонентов, воздействия окружающей среды.

Деформации бетона могут быть разделены на две группы:

- возникающие при действии внешней нагрузки (силовые);
- обусловленные способностью бетона изменять объем под влиянием изменения температуры, влажности окружающей среды, различных физико-химических процессов (собственные).

Деформации первого типа возможны при однократном действии кратковременной нагрузки и при многократном и длительном нагружении.

Полная деформация бетона (рис. 11.15) в определенный момент времени  $\epsilon_t$  составляет:

$$\epsilon_t = \epsilon_y + \epsilon_{пл} + \epsilon_{ус}, \quad (11.30)$$

где  $\epsilon_y$  – упругая деформация;  $\epsilon_{пл}$  – пластическая деформация;  $\epsilon_{ус}$  – деформация усадки.

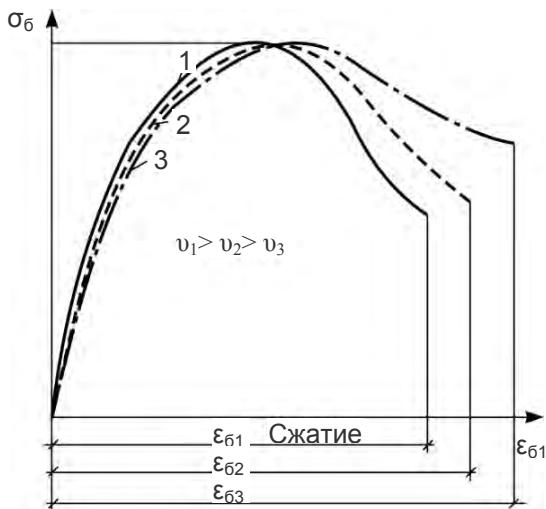


**Рис. 11.15.** Диаграммы напряжение ( $\sigma_6$ ) – деформация ( $\epsilon_6$ ) бетона при нагружении образцов с различной скоростью роста деформаций: кривые 1, 2, 3 соответствуют скоростям  $v_1, v_2, v_3$

Бетон не подчиняется закону Гука и имеет диаграмму сжатия криволинейного очертания (рис. 11.15), причем кривизна увеличивается с ростом напряжений.

При нагружении различных материалов в механике сплошных сред принято рассматривать в виде констант две характеристики упругости: отношение напряжения к величине деформации – модуль упругости  $E_6$  и коэффициент поперечной деформации  $\mu$  (коэффициент Пуассона). Для бетона эти харак-

теристики изменяются в процессе нагружения и по мере повышения

уровня напряжений  $\sigma$  имеют место все большие отклонения объемной деформации  $\theta$  от закона упругого изменения объема материала:

$$\theta = \frac{3\sigma(1 - 2\mu)}{E_6}. \quad (11.31)$$

Строго говоря, термин “модуль упругости” (модуль Юнга) относится непосредственно только к прямолинейному участку диаграммы напряжение-деформация. Этот начальный (мгновенный) модуль упругости имеет сравнительно небольшое практическое значение. Обычно для бетона модуль упругости или *модуль деформации* определяют как тангенс угла наклона секущей к кривой  $\sigma$ - $\epsilon$ . По мере роста напряжений значение  $E_6$  уменьшается.

При расчете элементов железобетонных конструкций в ряде случаев учитывают *предельные деформации* бетона при кратковременной нагрузке, т.е. такие деформации, которые могут быть достигнуты к моменту потери бетоном несущей способности или нарушения сцепления с арматурой. Для бетона, к которому предъявляют повышенные требования по трещиностойкости, предельные деформации, нормируют. Например, для гидротехнического массивного бетона в 180-суточном возрасте предельную растяжимость принимают не менее  $5 \cdot 10^{-5}$  для бетона внутренних зон и  $7 \cdot 10^{-5}$  – внешних.

Зависимость между напряжениями и деформациями изменяется от времени приложения нагрузки. Способность бетона деформироваться во времени при длительном действии постоянной нагрузки называют *ползучестью*. Существует ряд гипотез, рассматривающих механизм деформаций ползучести под действием внешней нагрузки, как результат действия капиллярных сил (Е. Фрейсине), механического выдавливания влаги из цементного камня (Р. Лермит), вязкого течения в точках контакта цементных зерен (У. Генсен) и др.

При напряжениях, превышающих 50-60% предела его прочности при сжатии, в бетоне быстро развиваются микротрещины и пластические деформации ползучести становятся нелинейными.

При снятии нагрузки деформации ползучести частично восстанавливаются. Необратимая (вторичная) часть деформаций обусловлена возникновением и развитием в бетоне микротрещин.

В качестве *меры ползучести* ( $C_m$ ) принимают удельные деформации бетона в определенном возрасте ( $\epsilon_{пз}$ ) на единицу постоянно действующего напряжения ( $\sigma_0$ ):

$$C_m = \varepsilon_{пз} / \sigma_0. \quad (11.32)$$

Комплекс факторов, влияющих на деформации ползучести, можно разделить на факторы технологического характера и характеризующие условия нагружения (рис. 11.16).



**Рис. 11.16.** Графики влияния основных факторов на относительную величину ползучести

Наиболее существенное влияние на конечное значение  $C_m$  оказывает В/Ц.

Деформации ползучести бетона оказывают различное влияние на работу конструкций, их долговечность. Для неармированного бетона при высоких уровнях нагрузки ползучесть ускоряет достижение предельной деформации и разрушение материала. В то же время в конструкциях ползучесть бетона уменьшает внутренние напряжения, обусловленные неоднородностью усадки, что приводит к повышению трещиностойкости. За счет ползучести бетона увеличиваются прогибы железобетонных балок под действием постоянных нагрузок, в железобетонных колоннах она приводит к постепенному перераспределению нагрузки с бетона на арматуру. В предварительно напряженных железобетонных элементах в результате ползучести бетона возможна потеря напряжения арматуры, что надо учитывать при выборе арматурной стали.

Собственные деформации бетона обусловлены влажностными, температурными и иными воздействиями на бетон при отсутствии внешней нагрузки. Изменение влажности бетона может вызывать



как уменьшение, так и увеличение его объема и, соответственно, линейные деформации усадки или расширения (набухания).

Увеличение объема – набухание – имеет место при длительном нахождении образцов бетона в воде в результате развития осмотического давления в гелевидных массах.

По мере понижения относительной влажности окружающей среды и нарушения гигроскопического равновесия среда-бетон будут происходить испарение воды из материала, и развиваться усадочные деформации.

Усадка бетона при изменении его влажности происходит в две стадии:

1) когда бетонная смесь находится в пластичном состоянии (пластическая усадка);

2) по мере твердения и высыхания бетона.

*Пластическая или первичная усадка бетона* происходит при выделении воды из бетонной смеси в результате седиментационного осаждения твердых частиц, поглощения влаги опалубкой, в дорожных покрытиях – основанием и испарения.

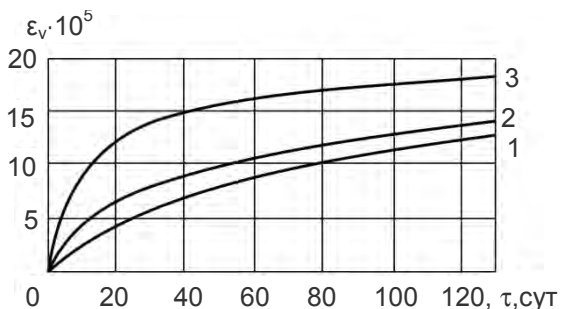


**Рис. 11.17.** Влияние расхода цемента и водоцементного отношения на усадку бетона трех составов:

1 – Ц=350 кг/м<sup>3</sup>, В/Ц=0,45; 2 – Ц=450 кг/м<sup>3</sup>, В/Ц=0,35; 3 – Ц=450 кг/м<sup>3</sup>, В/Ц=0,45

Деформации интенсивно развиваются сразу после укладки и уплотнения бетонной смеси и затухают уже через 30-90 мин. Величина пластической усадки зависит от состава бетонной смеси и уменьшается при снижении водосодержания бетонной смеси, расхода цементного теста, применении тонкомолотых вододерживающих доба-

вок, создании жесткого "скелета" крупного заполнителя. При ненадлежащем влажностном уходе и повышенной скорости испарения воды создаются условия для пластического трещинообразования. Пла-

стическая усадка усиливается с увеличением модуля поверхности конструкций, уменьшением степени армирования.

В наибольшей мере сказывается на поведении бетона в конструкциях *влажностная или гидравлическая усадка*, характерная по мере высыхания бетона.

На величину усадки бетона, кроме основного фактора – водосодержания влияют длительность твердения, химико-минералогический состав цемента и его расход, содержание заполнителей и др. (рис. 11.17, 11.18). Усадочные деформации вызывают

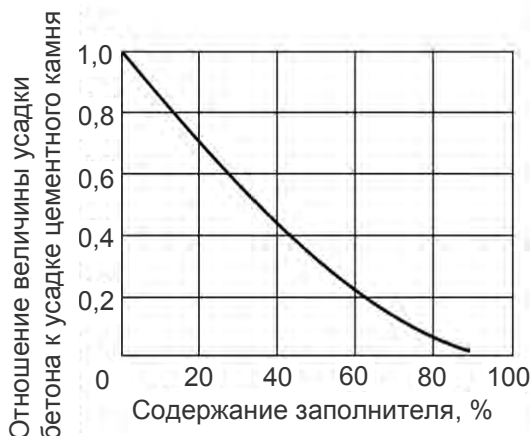


**Рис.11.18** Влияние содержания заполнителя в бетоне (по объему) на величину отношения усадки бетона к усадке цементного камня

в бетоне внутренние напряжения особенно значительные при неравномерном высыхании конструкций и работе их в стесненных условиях. Они могут быть причиной разрывов в контактной зоне и растворной части бетонов и вызывать, особенно в сочетании с температурными напряжениями, появление трещин. Усадочные напряжения неблагоприятно влияют на морозостойкость, непроницаемость, уста-

lostную прочность, вызывают потери предварительного напряжения при натяжении арматуры.

Общая усадка цементного камня обычно составляет от 3 до 5 мм/м, в бетоне она колеблется в основном, от 0,2 до 0,4 мм/м.

**Стойкость бетона к физическим и химическим воздействиям.** Долговечность бетона обеспечивается при соответствии его состава и структуры условиям эксплуатации конструкций и сооружений. Стойкость бетона характеризуется его способностью сохранять заданные показатели качества и работоспособность при воздейст-

вии агрессивных факторов окружающей среды, из которых наиболее характерны воздействия температуры и водной среды.

*Морозостойкость* бетона – способность его сохранять прочность и работоспособность при действии попеременного замораживания и оттаивания в насыщенном водой состоянии.

Снижение прочности влажного бетона при попеременном замораживании и оттаивании обусловлено, в основном образованием льда в порах бетона. В результате того, что объем, занимаемый льдом, на 9% больше объема воды, возникают значительные растягивающие напряжения, действующие на стенки пор и постепенно расшатывающие его структуру.

Влияние циклического изменения температуры усиливается дополнительным воздействием растворов солей. Получила, например, широкое распространение практика применения солей ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ) для удаления льда с дорожных покрытий. В результате таяния льда при посыпке соли на поверхность бетона поглощается большое количество теплоты (334 Дж/г) и температура резко понижается. На поверхности бетона фиксируется понижение температуры до  $9^\circ\text{C}$  в течение 1 мин (“температурный шок”), что вызывает возникновение растягивающих напряжений.

При попеременном замораживании и оттаивании насыщенных водой железобетонных конструкций нарушается соответствие температурных деформаций стали и бетона, в результате возникают значительные внутренние напряжения и уменьшается прочность сцепления стали с бетоном. Растягивающие напряжения в арматуре при замораживании насыщенных водой железобетонных конструкций могут достигать 120-150 МПа.

Морозостойкость бетона обусловлена прежде всего строением его порового пространства.

Капиллярные поры являются основным дефектом структуры цементного камня. В свежеприготовленном тесте можно считать капиллярными порами все пространство, заполненное водой. При твердении часть его заполняется гелем. Чем больше степень гидратации цемента ( $\alpha$ ), тем больше образуется геля и тем меньший объем остается на капиллярные поры (рис. 11.19).

Всю совокупность строительно-технологических факторов, влияющих на морозостойкость бетона можно разделить на две группы:

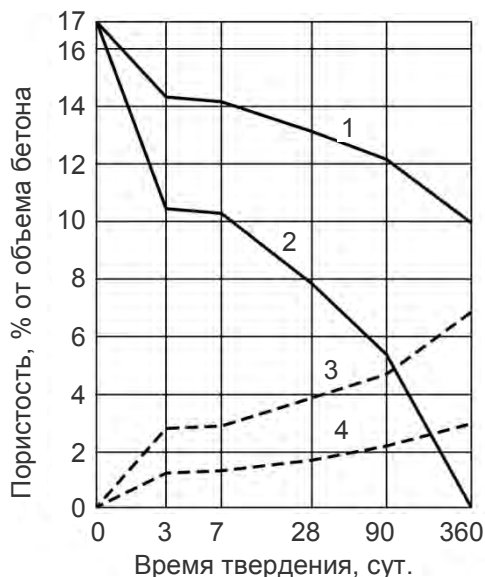


**Рис. 11.19.** Изменение объема основных видов пор в бетоне:

1 — общей пористости; 2 — капиллярных пор; 3 — пор геля; 4 — контракционных пор

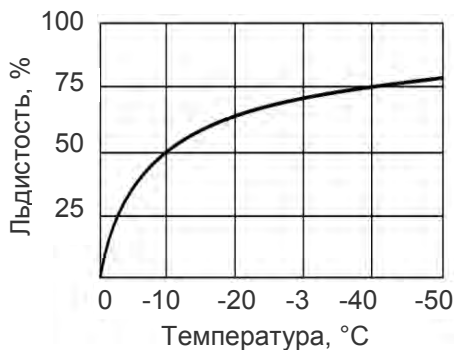


**Рис. 11.20.** Рост льдистости бетона при отрицательных температурах

1) факторы, определяемые условиями эксплуатации конструкций;

2) факторы, учитывающие особенности исходных материалов, структуру, состав бетона и условия его твердения.

К важнейшим эксплуатационным факторам, кроме числа циклов замораживания и оттаивания, относятся степень водонасыщения и температура замораживания бетона.

Снижение прочности бетона после замораживания и оттаивания наблюдается лишь при его водонасыщении выше определенной величины, которая в свою очередь связана со значением отрицательной температуры. Вода в большинстве капиллярных пор замерзает при температуре до  $-15^{\circ}\text{C}$ . При дальнейшем понижении температуры происходит замерзание воды в более тонких порах (рис. 11.20) и при температуре  $-70\ldots-80^{\circ}\text{C}$  практически вся поровая вода находится в замерзшем состоянии, исключая воду, заполняющую мельчайшие гелевые поры и адсорбированную на стенках капиллярных пор.

Сравнительное определение морозостойкости бе-

тона замораживанием при  $-17$  и  $-50^{\circ}\text{C}$  показало, что разрушение бетона во втором случае ускоряется в 6...10 раз. Ускорение разрушения бетона при низких температурах учитывается при назначении марки бетона по морозостойкости (табл. 11.15).

Таблица 11.15  
Рекомендуемые марки бетона по морозостойкости (F)  
в зависимости от условий эксплуатации

| Характеристики<br>влажностного ре-<br>жима | Расчетная температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$ |           |          |           |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------|----------|-----------|
|                                            | -40                                                         | -20...-40 | -5...-20 | -5 и выше |
| В водонасыщенном состоянии                 | 300                                                         | 200       | 150      | 100       |
| В условиях эпизодического водонасыщения    | 200                                                         | 100       | 75       | 50        |
| В условиях воздушно-влажного состояния     | 150                                                         | 75        | 50       | 35        |

Объем открытых пор, влияющих на количество замерзаемой воды, зависит от водоцементного отношения (В/Ц) и степени гидратации цемента. С увеличением В/Ц возрастает как общий объем открытых пор, так и средний их размер, что также негативно влияет на морозостойкость (рис. 11.21). При этом повышаются проницаемость и водопоглощение и в таких бетонах невозможно образование существенного объема резервных пор. При проектировании морозостойких бетонов принято ограничивать В/Ц в зависимости от условий службы бетона в сооружениях. Снижение В/Ц возможно как за счет уменьшения расхода воды при применении пластифицирующих добавок, более жестких смесей, так и за счет увеличения расхода цемента. Второй способ снижения В/Ц технико-экономически неэффективен.

Вторая характеристика, определяющая наряду с В/Ц капиллярную пористость бетона – степень гидратации цемента, зависит от активности цемента, интенсивности роста ее во времени, длительности и условий твердения бетона.

Влияние качества цемента на морозостойкость бетона связано с минералогическим составом, тонкостью помола и наличием актив-

ной минеральной добавки. Из минералов цемента отрицательное влияние на морозостойкость оказывает  $C_3A$ .

В морозостойких бетонах нежелательны активные минеральные добавки особенно с повышенной водопотребностью.

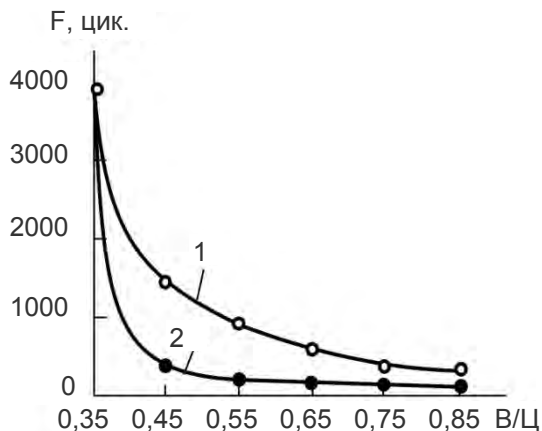


**Рис. 11.21.** Зависимость морозостойкости  $F$  бетона с вовлеченным воздухом (1) и обычного бетона (2) от  $В/Ц$

Пластифицирующие добавки повышают морозостойкость бетона как в результате уменьшения водопотребности и, соответственно, капиллярной пористости, так и вследствие определенного воздухововлечения.

Наибольший положительный эффект на морозостойкость оказывают воздухововлекающие ПАВ. Основные *воздухововлекающие добавки* относятся к гидрофобизирующим

ПАВ, обладающим значительной поверхностной активностью на границе раствор-воздух. Эти добавки при их введении с водой затворения вызывают образование в системе высокодисперсной эмульсии воздуха, устойчиво диспергированного в бетонной смеси. Морозостойкость бетона с воздухововлекающими добавками возрастает в несколько раз.

Наряду с воздухововлекающими для образования системы условно-замкнутых пор в бетоне применяют газообразующие добавки.

Основной метод оценки морозостойкости бетона характеризуется числом циклов замораживания и оттаивания образцов при нормированных условиях испытания без существенного снижения прочности. При основном стандартном способе испытаний замораживание производится при  $-15...-20^{\circ}\text{C}$  на воздухе, а оттаивание при  $+20^{\circ}\text{C}$  в воде. Для ускорения испытаний температуру замораживания снижают до  $-40...-60^{\circ}\text{C}$ , насыщают образцы водным со-

левым раствором, уменьшают их размеры, и сокращают длительность циклов.

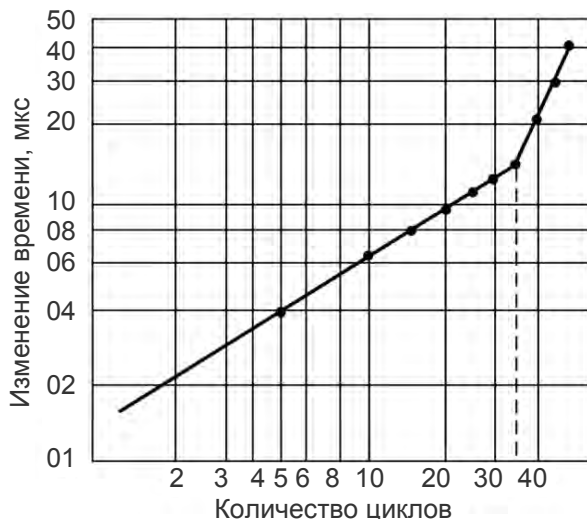


**Рис. 11.22.** Зависимость изменения времени прохождения ультразвука в бетоне от числа циклов замораживания-оттаивания

Наряду с определением морозостойкости путем прямого испытания прочности бетона через определенное число циклов замораживания и оттаивания применяют неразрушающие методы: определение скорости ультразвуковых волн (рис. 11.22); измерение динамического модуля упругости, а также остаточных

деформаций (относительного удлинения образцов после испытания).

В зависимости от числа циклов замораживания и оттаивания водонасыщенных образцов бетона до 5%-ного снижения прочности устанавливают т.н. *марку бетона по морозостойкости* (F). Последняя при проектировании конструкций назначается в основном в зависимости от числа переходов через  $0^{\circ}\text{C}$  в регионе эксплуатации конструкций и сооружений с поправкой на среднюю температуру холодного периода года.

Для получения долговечного бетона, подвергаемого нагреванию, важно свести к минимуму его деформации при температурном воздействии.

При тепловлажностной обработке изделий остаточные деформации имеют место при недостаточном предварительном выдерживании бетона до тепловой обработки, повышенной скорости подъема температуры и ее снижения после отключения подачи пара. Опасность возникновения трещин при развитии температурных напря-

жений повышается при обработке изделий большой толщины сплошного сечения или из ячеистых бетонов с повышенным водосодержанием.

Возникновение термических напряжений в бетоне возможно не только при его нагреве от внешних источников тепла, но и в результате саморазогрева за счет экзотермии при твердении. В практике производства бетонных работ и изготовления железобетонных конструкций приходится учитывать как положительную, так и отрицательную роль тепловыделения бетона. Первая характерна при зимнем бетонировании и в условиях тепловлажностной обработки конструкций, вторая – при возведении массивных сооружений и в других случаях, когда возможно возникновение значительных температурных градиентов в бетоне.

Нормируемое *тепловыделение* для массивных конструкций часто находится из условия лимитирования температуры бетона к определенному сроку твердения. Допустимое значение тепловыделения в  $\text{кДж/м}^3$  можно найти по формуле:

$$Q = \frac{C \rho_0}{K} (t_{\text{кр}} - t_0), \quad (11.33)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость бетона в  $\text{кДж/кг}^\circ\text{град}$ ;  $t_{\text{кр}}$  – критическое значение температуры бетона, устанавливаемое проектом;  $K$  – коэффициент, равный или меньший единицы, зависящий от условий охлаждения бетона в конструкции;  $t_0$  – начальная температура укладки.

Интенсивные деструктивные процессы при нагревании бетона идут при температуре более  $200^\circ\text{C}$  (рис. 11.23). Нагрев в интервале  $200\text{--}400^\circ\text{C}$  приводит к постепенному снижению прочности цементного камня и бетона из-за дегидратации, в основном, гидроалюминатов, а также распада и перекристаллизации гидросульфалюминатов кальция. Портландцементные образцы, прогретые до температуры  $600\text{--}800^\circ\text{C}$ , полностью разрушаются после выдерживания их в воздушно-сухих условиях в основном в результате вторичной гидратации оксида кальция. Основным способ придания бетону жароупорных свойств заключается во введении в цемент или бетонные смеси тонкомолотых минеральных добавок, которые химически связывают  $\text{CaO}$ , не образуют с минералами цемента легкоплавких веществ, являются устойчивыми к воздействию высоких температур и уменьшают усадку цементного камня при нагревании.



Портландцемент по *жаростойкости* значительно уступает шлакопортландцементу, образуя при гидратации значительно

$R_b$ , %

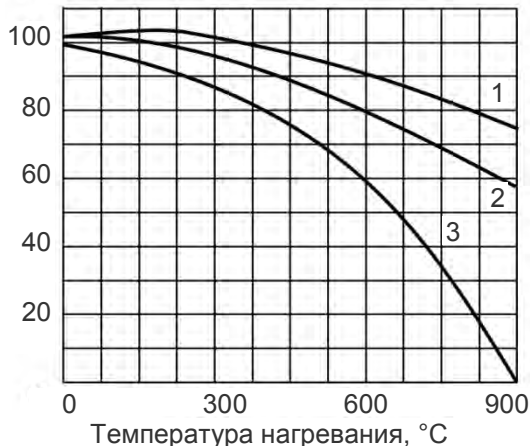


**Рис. 11.23.** Влияние температуры на прочность бетона:

- 1 – портландцемент 70% + трепел 30%;
- 2 – портландцемент 70% + пемза 30%;
- 3 – портландцемент

меньшее количество  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . При достаточной величине остаточной прочности на сжатие бетона после нагревания до  $800^\circ\text{C}$  и использовании шлакопортландцемента отпадает необходимость введения тонкомолотых добавок.

Специфическим видом разрушения бетона при тепловом воздействии является разрушение под воздействием огня в условиях пожара. Снижение прочности бетона в условиях пожара происходит в результате развития

внутренних напряжений вследствие различия температурного коэффициента линейного расширения цементного камня и заполнителей.

При температуре выше  $500^\circ\text{C}$  снижение прочности бетона под воздействием огня усиливается разложением гидроксида кальция и полиморфным превращением  $\beta$ -кварца в  $\alpha$ -кварц.

*Огнестойкость* характеризуется пределом огнестойкости – продолжительностью сопротивления воздействию огня до потери бетоном прочности и способности конструкций обеспечивать несущие и ограждающие функции.

Для бетонных и железобетонных конструкций предел огнестойкости составляет 2-5 ч. Его повышают, увеличивая толщину бетонного слоя и подбирая соответствующий состав бетона.

Способность бетона противостоять, не разрушаясь, совместному действию напряжений от механической эксплуатационной нагрузки

и термических напряжений при определенном числе циклов нагрева и охлаждения либо при температурном градиенте называют *термостойкостью*. Термическая стойкость бетона, характеризующаяся количеством циклов нагревания и охлаждения до определенного снижения прочности, линейно связана с его коэффициентом термического расширения (к.т.р.) Для цементного камня величина к.т.р. находится в пределах от  $10 \times 10^{-6}$  до  $18,3 \times 10^{-6}$  на  $1^\circ\text{C}$ .

При интенсивном тепловом воздействии разрушению в большей степени подвергаются поверхностные слои бетона в изделиях и конструкциях с наибольшим градиентом влажности.

Термостойкость бетона увеличивается с уменьшением размера крупного заполнителя, тщательном приготовлении бетонной смеси и уходе за бетоном при его твердении с целью получения структуры с наименьшим количеством и минимальными по длине трещинами.

Величина коэффициента расширения и термостойкость уменьшаются с возрастом бетона.

Термостойкость бетона можно увеличить дисперсным армированием температуростойкими волокнами из асбеста, базальта или стальных фибр, конструктивным армированием, применением заполнителей из андезита, базальта, диабазы и других материалов, обеспечивающих минимальное различие температурных деформаций отдельных компонентов.

*Проницаемость бетона*, характеризует его способность пропускать газы и жидкости при определенном перепаде давления.

Водонепроницаемость бетона назначают, исходя из допустимых фильтрационных потерь через бетон и стойкости его к коррозии. Фильтрационные потери имеют особенно существенное значение в гидротехнических сооружениях, например для высотных напорных плотин, облицовок каналов и т.д.

Возможно использование двух нормативных характеристик водонепроницаемости:

1. *наибольшего давления воды* (МПа), которое могут выдержать стандартные образцы с высотой и диаметром 150 мм без появления на их открытой стороне признаков просачивания воды;

2. *коэффициента фильтрации* бетона, характеризующего количество воды, проникающее через единицу сечения за единицу времени, при градиенте (отношении напора в м водяного столба к толщине конструкции в м) в равном 1.

В зависимости от первого показателя различают т.н. марки бетона по водонепроницаемости: W2, W4 и т.д.

Для большинства составов бетона движение воды идет по капиллярам с радиусом  $10^{-3}$  см и менее, что обуславливает определенную корреляцию между капиллярной пористостью, В/Ц цементного камня и коэффициентом фильтрации (рис. 11.24). Высота под-

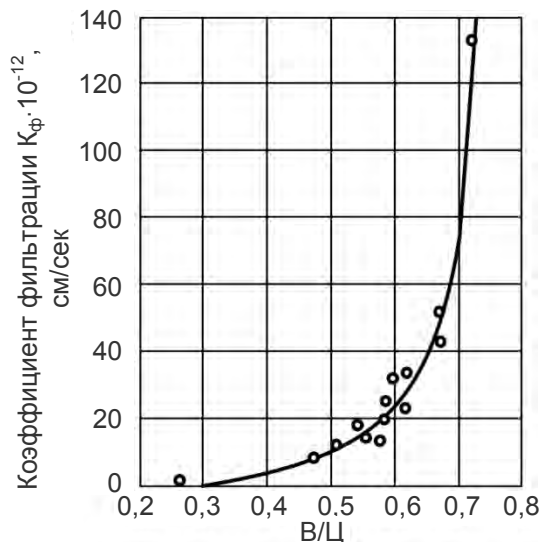


**Рис. 11.24.** Зависимость между проницаемостью и водоцементным отношением цементного камня

нятия жидкости в капиллярах обратно пропорциональна их радиусу.

Эффективным способом понижения проницаемости бетона является введение как органических так и неорганических добавок в бетонную смесь. Из органических добавок применяют поверхностно-активные вещества (ПАВ) и полимерные добавки. При снижении общей проницаемости бетона и повышении водонепроницаемости ПАВ используют для сниже-

ния В/Ц, повышения плотности и уменьшения среднего радиуса капилляров. Положительно сказывается на повышении водонепроницаемости гидрофобизация капилляров, достигаемая при применении гидрофобизирующих ПАВ.

Ряд добавок-мономеров при пропитке ими бетона кольматируют капиллярные поры, образуя в материале в зависимости от вида добавки термореактивные и термопластичные полимеры.

Неорганические добавки для понижения проницаемости представлены различными солями, бентонитовыми и другими глинами, активными минеральными добавками.

После изготовления изделий и конструкций из бетона понижение его проницаемости может достигаться обработкой поверхности бетона гидрофобизаторами и веществами, химически реагирующими с минералами цементного камня с образованием нерастворимых соединений; кольтатацией порового пространства; покрытием поверхности бетона защитными материалами.

Степень агрессивного воздействия внешней среды определяется ее химическим составом и комплексом факторов, характеризующих условия контакта среды и бетона.

Газообразные, жидкие или твердые среды, в которых эксплуатируется бетон, с позиции их агрессивности принято классифицировать на неагрессивные (Н), слабо- (Сл), средне- (Ср) и сильноагрессивные (Си) (табл. 11.16).

Таблица 11.16

Степень воздействия агрессивной среды на бетон в течение 1 года

| Показатели коррозии   | Степень агрессивности среды |                                 |                                        |                                             |
|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|
|                       | Н                           | Сл                              | Ср                                     | Си                                          |
| Снижение прочности, % | нет                         | менее 5                         | 5...20                                 | более 20                                    |
| Внешние признаки      | -                           | Слабое поверхностное разрушение | Повреждение углов или волосные трещины | Ярко выраженное разрушение (растрескивание) |

Агрессивные газы являются, как правило, кислыми или кислотообразующими. Образование из них кислот происходит при наличии на поверхности конструкций или в воздухе капельно-жидкой влаги. При влажности до 60% кислые газы практически не разрушают бетон, а в ряде случаев даже уплотняют его. Такое действие оказывают, например, газы, содержащие углекислый газ (карбонизация), четырехфтористый кремний.

Твердые среды в виде порошков, аэрозолей пылей могут оказывать заметное, а иногда значительное агрессивное действие на бетон при высокой растворимости (более 2 г/л) и гигроскопичности.

Жидкими агрессивными средами для бетона могут быть природные поверхностные и грунтовые воды, промышленные и хозяйственно-бытовые сточные воды и другие жидкие продукты.

Для характеристики наиболее характерных жидких сред, кроме концентрации агрессивных веществ учитываются температура, напор или скорость движения у поверхности конструкций. Степень агрессивного воздействия жидких сред (табл. 11.17) зависит от концентрации водородных ионов (рН), содержания свободной углекислоты, магниевых солей, едких щелочей, сульфатов. К жидким агрессивным средам, кроме водных растворов солей, кислот и щелочей, относятся масла, нефтепродукты, растворители.

Таблица 11.17

Агрессивное воздействие некоторых жидких сред на бетон

| Среда                                      | Степень агрессивного воздействия |         |         |
|--------------------------------------------|----------------------------------|---------|---------|
|                                            | слабая                           | средняя | сильная |
| Растворы кислот, рН                        | >4                               | 4-1     | <1      |
| Растворы едких щелочей, %                  | 5-8                              | 8-15    | >15     |
| Растворы аммонийных солей, %               | 0,05-0,1                         | 0,1-0,5 | >0,5    |
| Растворы сульфатов натрия, магния и др., % | 0,2-0,5                          | 0,5-1   | >1      |
| Растворы других солей, %                   | 1-2                              | 2-3     | >3      |

Агрессивные свойства воды определяет степень ее минерализации, жесткости, а также кислотности или щелочности. Обычно воды рек и озер имеют слабощелочную реакцию. Общее содержание солей в речных водах, как правило, не превышает 0,3-0,5 г/л. Морская вода может содержать до 35 мг/л солей, из них в среднем NaCl – 78%; MgCl<sub>2</sub> – 11%; MgSO<sub>4</sub> – 4,7%; CaSO – 3,6; K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – 2,5%.

*Коррозионная стойкость* бетона непосредственно связана с его плотностью, а последняя с водонепроницаемостью (табл. 11.18).

По классификации В.М.Москвина к *коррозии I вида* относятся процессы, связанные с выщелачиванием извести (точнее, Ca(OH)<sub>2</sub>) из бетона, вследствие ее большей растворимости в воде по сравнению с другими гидратами. В настоящее время к коррозии I вида относят все процессы, связанные с растворением в воде веществ, входящих в бетон.

Показатели плотности бетона

| Бетон                    | Марка по водонепроницаемости | Водопоглощение, % по массе | Максимально допустимое В/Ц |
|--------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Нормальной плотности (Н) | W4                           | 4,7...5,7                  | 0,6                        |
| Повышенной плотности (П) | W6                           | 4,2...4,7                  | 0,55                       |
| Особо плотный (О)        | W8                           | До 4,2                     | 0,45                       |

Для предотвращения или уменьшения интенсивности коррозии I вида особенно большое значение имеет плотность бетона. Вторым важнейшим направлением повышения коррозионной стойкости бетона является связывание  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  активными минеральными добавками, введенными в цемент или непосредственно в бетонные смеси (рис. 11.25).

*Коррозия II вида* обусловлена протеканием обменных реакций между продуктами гидратации цемента и кислотами или солями, воздействующими на бетон. Наиболее характерными разновидностями коррозии II вида являются *углекислая, кислотная и магниезиальная* коррозия.

В результате воздействия на продукты твердения цемента кислот и солей магния образуются соли кальция, обычно хорошо растворимые в воде и малопрочные рыхлые массы  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . Наиболее опасной является магниезиально-сульфатная коррозия, поскольку в результате реакций  $\text{MgSO}_4$  с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  а также с гидросиликатами и гидроалюминатами кальция образуется не только аморфный  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , но и кристаллизуется гипс, объем которого больше суммарного объема исходных веществ, что вызывает значительные напряжения в цементном камне.

*Коррозия III вида* развивается в бетоне от внутренних напряжений при накоплении в порах и капиллярах малорастворимых солей. Это может быть как результатом кристаллизации продуктов химических реакций, так и процесса кристаллизации при поглощении солей из агрессивных растворов.

Наиболее распространенной коррозией этого вида является *сульфатная* коррозия, которая происходит в цементном камне под влиянием анионов  $\text{SO}_4^{2-}$ , связанных с катионами  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . В грунтовых водах обычно содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  не превышает 60 мг/л, в морской оно может достигать 2500...2880 мг/л. Разновидностями сульфатной коррозии являются сульфоалюминатная и гипсовая коррозия. Кристаллизация  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  имеет место при концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$  более 300 мг/л. В присутствии ионов кальция кристаллизация  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  начинается при более низких концентрациях  $\text{CaSO}_4$  в растворе.

Высокая сульфатостойкость бетона при его достаточной плотности обеспечивается применением сульфатостойких портландцементов с нормированным (не более 5%) содержанием  $\text{C}_3\text{A}$ .

Отложение солей в порах цементного камня возможно и при их кристаллизации из солевых растворов в результате капиллярного подсоса и испарения воды. *Солевая* коррозия характерна в условиях теплого и су-

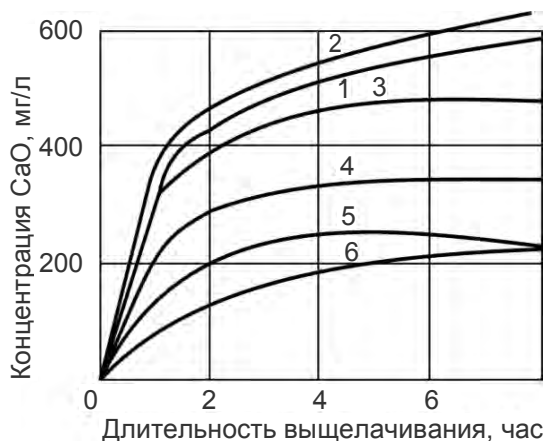


**Рис. 11.25.** Скорость выщелачивания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  дистиллированной водой из цементного камня на разных цементах: 1 — песчаный портландцемент; 2 — портландцемент; 3 — гипсошлаковый цемент; 4 — пуццолановый цемент; 5 — песчано-пуццолановый цемент; 6 — глиноземистый цемент

хого климата при наличии в грунте водорастворимых солей в количестве более 1% или высокого уровня грунтовых вод с минерализацией не менее 3 г/л. При соответствующих температурно-влажностных условиях ряд солей из безводных или маловодных форм ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) переходят в порах цементного камня в высокооводненные формы кристаллогидратов ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  и т.д.). Такой переход со-

проводится увеличением объема твердой фазы в 1,5-3 раза и большими деформациями.

Коррозия бетона III вида может происходить не только при взаимодействии бетона с внешней средой, но и в результате разрушительных процессов, происходящих при химическом взаимодействии компонентов бетонной смеси. Характерным примером таких процессов является взаимодействие щелочей, содержащихся в цементе, с кремнеземом заполнителей. В портландцементе содержание растворимых соединений достигает 1-1,5% (в пересчете на  $\text{Na}_2\text{O}$ ). Реакционноспособными в среде щелочей являются некоторые модификации кремнезема (тридимит, кристобалит), кремнеземистое стекло, опал, халцедон и другие включения), встречающиеся в заполнителях. Продукты реакции между щелочами цемента и активным кремнеземом расширяются в объеме и создают разрушающее давление.

Наиболее действенным способом предупреждения рассматриваемой коррозии является ограничение содержания щелочей в цементе до 0,6%. Замедляются процессы щелочной коррозии при введении в цемент активных минеральных и некоторых других добавок (углекислый литий, альбумин и др.).

*Щелочестойкость* бетона является относительно высокой в растворах низкой концентрации, однако в концентрированных растворах ( $>5000$  мг/л) возможно значительное снижение прочности и разрушение бетона.

*Органогенная* коррозия бетона развивается под влиянием органической агрессивной среды. На многих предприятиях пищевой, деревообрабатывающей, легкой и других отраслей промышленности образуются или используются продукты, содержащие органические кислоты. Из органогенных сред пищевой промышленности наиболее коррозионно активными по отношению к цементному бетону являются жиры и растительные масла.

Разрушения материалов под воздействием растительных и животных организмов называют *биоповреждениями*. С биологически активной средой контактируют гидротехнические сооружения, строительные конструкции сооружений на различных предприятиях пищевой промышленности и микробиологических производств. Например, мидии, поселяющиеся на поверхности подводных морских сооружений (до  $40$  кг на  $1 \text{ м}^2$ )



способны выделять до  $12,2 \text{ см}^3 \text{ СО}_2$  за 1 ч на 1 кг своей массы. Из бактерий, воздействующих на цементный камень, наиболее сильными являются динитрифицирующие бактерии, в результате жизнедеятельности которых выделяется серная кислота. Анаэробные азотнофиксирующие бактерии образуют масляную кислоту.

Особым видом агрессивной среды для бетона являются ионизирующие излучения. В наибольшей степени ионизирующему облучению подвергаются строительные конструкции ядерных реакторов. Способность материалов после облучения сохранять свои свойства называется *радиационной стойкостью*.

На радиационную стойкость бетона влияет плотность потока частиц, интенсивность излучения и поглощенная доза излучения. Плотность потока, например, нейтронов, покидающего ядерный реактор, может достигать  $5 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ , у изотопного источника –  $10^7$ – $10^8 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ . Интенсивность излучения составляет, соответственно,  $10^4$  и  $10^7$ – $10^6 \text{ Вт/м}^2$ . Доза излучения, поглощенная строительными конструкциями, расположенными непосредственно за корпусом ядерного реактора за 30 лет его службы, составляет  $10^{11}$ – $10^{12} \text{ Дж/кг}$ .

При облучении существенно изменяется структура минеральных материалов, в них накапливаются дефекты, снижается плотность, изменяются упругие и теплофизические свойства. Для гранита, например, при облучении, превышающем критическую дозу ( $1,5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$ ), развиваются трещины, плотность снижается примерно на 15%, линейные деформации достигают 6-7% и при дозе облучения  $2,8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$  происходит полное разрушение. Для магматических горных пород радиационная стойкость возрастает по мере снижения содержания кристаллического кремнезема, уменьшения размера кристаллов, увеличения основности, перехода от глубинных пород к излившимся.

Радиационное облучение вызывает нагрев бетона до 300-350°C, его обезвоживание и усадку. Деформации при облучении цементного камня и бетона значительно превосходят возможные деформации при испарении воды. Прохождение излучений через материал сопровождается ионизацией и возбуждением молекул, что создает условия для радиационно-химических реакций, прохождения радиолиза свободной и химически связанной воды, выделения газов – водорода и кислорода. При интенсивном и длительном облучении

бетона часть продуктов твердения и минералов, образующих заполнители, переходит в аморфное состояние. Деструктивные процессы при облучении приводят к снижению прочности бетона, изменению модуля упругости, развитию деформаций ползучести.

Бетоны на портландцементе можно успешно применять при интегральной дозе облучения до  $(7...10)10^{24}$  нейтронов на  $1 \text{ м}^2$ .

## 11.2. Разновидности бетонов

В строительстве наиболее распространены тяжелые цементные бетоны общего назначения – *конструкционные бетоны*. Основными показателями качества конструкционных бетонов являются прочность на сжатие, осевое растяжение, растяжение при изгибе, морозостойкость, водонепроницаемость. Средняя плотность тяжелых бетонов колеблется в пределах от 2200 до 2500  $\text{кг/м}^3$ .

**Разновидности тяжелых бетонов.** Наряду с крупнозернистыми бетонами, изготавливаемыми на заполнителях с крупностью зерен до 80 мм (для массивных конструкций крупность заполнителей достигает до 120 мм) в строительстве находят применение *мелкозернистые бетоны* с крупностью заполнителей до 10 мм. Распространенной разновидностью этого вида бетонов является *песчаный бетон*, не содержащий крупный заполнитель. Сравнительно высокая удельная поверхность заполнителя в песчаном бетоне обуславливает повышенный (на 20-40%) расход цемента, необходимый для заполнения межзерновых пор и создания достаточной обмазки цементного теста. Снижение расхода цемента достигается выбором оптимального гранулометрического состава заполнителя, введением активных минеральных добавок и микрозаполнителей, применением суперпластификаторов и эффективных способов уплотнения.

Ю.М. Баженов предложил зависимость прочности мелкозернистого бетона в виде эмпирической формулы:

$$R_6 = AR_{\text{ц}} \left( \frac{\Pi}{B + V_{\text{вх}}} - 0,8 \right), \quad (11.34)$$

где  $A$  – коэффициент: для материалов высокого качества  $A=0,8$ , среднего – 0,75 и низкого – 0,65;  $V_{\text{вх}}$  – объем вовлеченного воздуха.

Наибольшая прочность достигается при оптимальном соотношении между цементом и песком ( $\Pi:B$ ) (рис. 11.26). Для такого соотношения характерна и наибольшая плотность бетонной смеси. Осо-

бенностью мелкозернистых бетонных смесей является повышенное воздухововлечение.

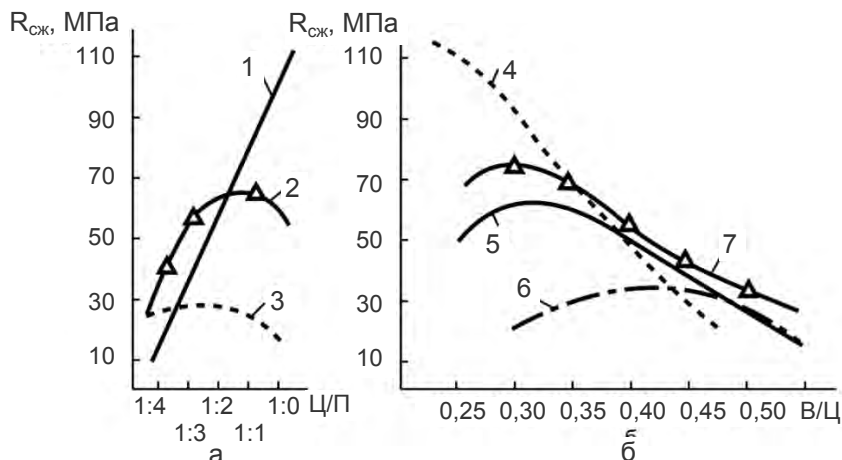


**Рис. 11.26.** Зависимость прочности мелкозернистого бетона от его состава (а) и величины  $В/Ц$  (б):

1 –  $В/Ц=0,3$ ; 2 –  $В/Ц=0,4$ ; 3 –  $В/Ц=0,5$ ; 4 –  $Ц/П=1,0$ ; 5 –  $Ц/П=1,2$ ; 6 –  $Ц/П=1,4$ ; 7 – обычный бетон для сравнения

Введение суперпластификаторов позволяет существенно снизить  $В/Ц$  без изменения подвижности, что приводит соответственно к увеличению класса мелкозернистых бетонов по прочности. Для мелкозернистых бетонов характерно повышенное отношение прочности на растяжение и изгиб к прочности на сжатие (рис. 11.27). При равной прочности на сжатие прочность при изгибе для мелкозернистых бетонов на 10-15% выше, чем у обычных. Повышенные значения прочности при растягивающих и изгибающих напряжениях мелкозернистых бетонов объясняются большей однородностью их структуры. Особенности структуры сказываются также на деформативных свойствах мелкозернистых бетонов. Они имеют модуль упругости на 20-30% ниже, чем у обычного бетона, более высокие значения усадки и ползучести. Деформативность и ползучесть могут быть значительно снижены за счет повышения жесткости бетонных смесей, применения силовых методов уплотнения.

*Литые и самоуплотняющиеся бетоны* – бетоны, способные свободно течь и уплотняться под действием собственной массы.

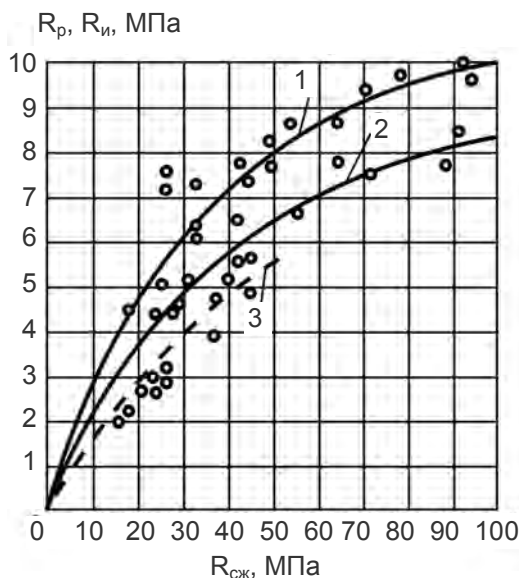


**Рис.11.27.** Зависимость прочности бетона при изгибе ( $R_{и}$ ) и растяжении ( $R_p$ ) от прочности при сжатии ( $R_{сж}$ ): 1 —  $R_{и}$  песчаного бетона; 2 —  $R_{и}$  обычного бетона; 3 —  $R_p$  песчаного бетона

Литые бетоны характеризуются подвижностью смесей по осадке конуса более 15 см. Для обеспечения связности литой бетонной смеси рекомендуется проводить специальные мероприятия, повышающие водоудерживающую способность: увеличивать содержание песка в бетонной смеси до 40-50% от массы заполнителя; ограничивать значение В/Ц для предотвращения водоотделения и расслоения цементного теста; применять суперпластификаторы, воздухововлекающие или специальные водоудерживающие добавки (бентонитовые

глины, кремнегель); использовать цементы с достаточной водоудерживающей способностью.

Достаточно действенным приемом является введение в литые бетонные смеси *золы-уноса* ТЭС. Использование золы-уноса позволяет получить литые бетоны при таком же расходе цемента, что и при производстве умеренно подвижных смесей.

Эффективность использования литых бетонных смесей в строительстве значительно повышается с применением пластифицирующих добавок, в особенности суперпластификаторов. Применение таких добавок позволяет получить литые бетоны с пониженным расходом воды и обеспечить необходимую водоудерживающую способность, набор распалубочной прочности через 4-4,5 часа при температуре воздуха 20-25°C, сохранение подвижности в течение 40-50 мин и более.

Высокотехнологической разновидностью литых бетонов являются *самоуплотняющиеся бетоны* (Self-Compacting Concretes), т.е. бетоны на основе смесей, способных без вибрации заполнять формы и опалубку любой конфигурации при повышенной однородности и отсутствии склонности к образованию микротрещин. Такие бетонные смеси характеризуются подвижностью по диаметру расплыва стандартного конуса. Европейские нормы предусматривают три класса самоуплотняющихся бетонных смесей по удобоукладываемости: 1) с диаметром расплыва  $D=550-650$  мм; 2)  $660-750$  мм; 3)  $760-850$  мм.

Изготовление самоуплотняющихся бетонов возможно при комплексном использовании рассмотренных приемов получения литых бетонов, применении наиболее эффективных суперпластификаторов.

Главные преимущества литых и самоуплотняющихся бетонов состоят в возможности с их помощью снизить энерго- и трудозатраты, улучшить условия труда при выполнении бетонных работ вследствие снижения шумовых и вибрационных воздействий.

Для укладки литых и самоуплотняющихся смесей при монолитном бетонировании широко используют бетононасосы. Пластификаторы, резко уменьшая водопотребность литых смесей, вместе с тем улучшают способность их к перекачиванию, снижают необходимое давление и уменьшают его потери.

К *высокопрочным бетонам* в настоящее время относят бетоны с прочностью при сжатии в 28-суточном возрасте  $70-150$  МПа.

Евростандарт EN206 предусматривает возможность изготовления и применения бетонов (High Strength Concrete) включая класс B115. К высокопрочным бетонам можно отнести и т.н. высококачественные бетоны (High Performance Concrete) имеющие прочность на сжатие в возрасте 2 сут. –  $30-50$  МПа, 28 сут. –  $60-150$  МПа, морозостойкость – F600 и более, водонепроницаемость – W12 и выше, водопоглощение – менее 1-2%, истираемость – не более  $0,3-0,4$  г/см<sup>2</sup>, регулируемые показатели деформативности.

Достижение высокой прочности тяжелого бетона на высокопрочных заполнителях возможно повышением плотности и прочности цементного камня (когезионный фактор) и прочности контактной зоны (адгезионный фактор). Основным направлением достиже-

ния высокой прочности бетона является обеспечение предельно низких водоцементных значений при достаточно высокой степени гидратации цемента и необходимом уплотнении бетонной смеси. При низких значениях В/Ц положительно влияет на прочность бетона оптимизация соотношения между содержанием щебня и растворной составляющей.

Традиционными способами уменьшения В/Ц при постоянном расходе цемента являются снижение расхода воды и переход на жесткие смеси, применение пластифицирующих добавок, повышение

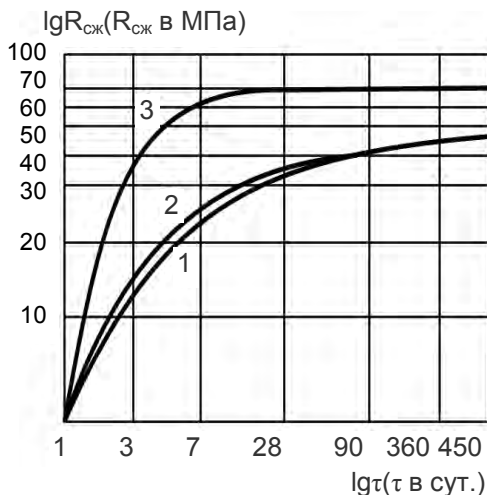


**Рис. 11.28.** Кинетика твердения бетонов с суперпластификаторами С-3: 1 – бетон без добавки; 2 – с С-3 при постоянном В/Ц; 3 – с С-3 со сниженным В/Ц

морских платформ, виброгидропрессованных труб. В лабораторных условиях получены бетоны прочностью до 200 МПа и выше.

Прочность бетона практически линейно изменяется с увеличением активности цемента. Высокопрочные бетоны классов В50...В80 можно изготавливать при умеренных В/Ц, применяя цементы марок М700-М800. В промышленности имеется опыт изготовления таких цемента в основном за счет увеличения содержания алита в клин-

чистоты заполнителей, переход на заполнители с меньшей удельной поверхностью.

Благодаря применению эффективных модификаторов (суперпластификаторов (СП) и микрокремнеземистых добавок), освоена новая промышленная технология производства бетонов с высокой проектной и ранней (рис. 11.28) прочностью, разработаны соответствующие нормы. Такие бетоны все шире применяют для несущих конструкций монолитных каркасов высотных домов, мостов,

кере до 60-65% и повышении удельной поверхности цемента до 4000-4500 см<sup>2</sup>/г. Бетоны на указанных цементах набирают через сутки твердения в естественных условиях 20-40% и через трое суток 50-70% марочной прочности. Однако производство таких цементов характеризуется высокой энергоемкостью и не получило распространения.

К эффективным вяжущим для высокопрочных бетонов относятся вяжущие низкой водопотребности (ВНВ), получаемые тонким помолом портландцементного клинкера и минеральной добавки с введением порошкообразного суперпластификатора. Водопотребность бетонных смесей на ВНВ на 35-50% ниже, чем на исходном портландцементе.

Прочность и другие свойства бетонов существенно повышаются при пропитке их полимерными составами или мономерами с последующей полимеризацией. При пропитке бетонов мономерами (стиролом, метилметакрилатом и др.) получают *бетонополимеры*, входящие в группу "*П-бетонов*", объединяющую различные разновидности бетонов, в которых используются полимеры – как в качестве добавок, так и основных компонентов. К бетонополимерам по технологии и ряду свойств близки бетоны, пропитанные серой и жидким стеклом.

До пропитки изделия подвергают высушиванию. Для более полного удаления влаги из предварительно высушенных изделий их подвергают вакуумированию. Монолитный бетон вакуумируют с помощью вакуум-щитов.

При пропитке бетона изменяется его структура, в первую очередь радикально уменьшается открытая капиллярная пористость, уплотняется контактная зона цементного камня с заполнителями.

Завершающей операцией получения бетонополимерных изделий является полимеризация мономера в порах бетона. В качестве инициаторов полимеризации используют соединения, которые при нагревании распадаются и образуют свободные радикалы (перекиси водорода, бензоила и др.). Процессы полимеризации легко инициируются также энергией радиационного излучения. В табл. 11.19 приведено сравнение некоторых свойств исходного бетона и бетона при пропитке и последующей полимеризации метилметакрилата по данным Ю.М. Баженова.

Свойства бетона и бетонополимера

| Показатель                                                   | Исходный бетон                      | Бетонополимер                     |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Предел прочности, МПа:<br>при сжатии<br>растяжении<br>изгибе | 30-50<br>2-3<br>5-6                 | 100-200<br>6-19<br>14-28          |
| Модуль упругости при сжатии, МПа                             | $2,5 \cdot 10^4$ - $3,5 \cdot 10^4$ | $3,5 \cdot 10^4$ - $5 \cdot 10^4$ |
| Прочность сцепления с арматурой, МПа                         | 1-2                                 | 10-18                             |
| Деформация усадки                                            | $50 \cdot 10^{-5}$                  | $0,5 \cdot 10^{-5}$               |
| Деформация ползучести                                        | $(40-60) \cdot 10^{-5}$             | $(6-8) \cdot 10^{-5}$             |
| Электрическое сопротивление, Ом                              | $10^5$                              | $10^{14}$                         |
| Водопоглощение, %                                            | 3-5                                 | 1                                 |
| Морозостойкость, циклы                                       | 200                                 | 5000                              |

При повышении температуры до 200°C прочность бетонополимера значительно снижается и достигает прочности исходного бетона, однако при охлаждении до комнатной температуры она в основном, восстанавливается.

Бетонополимеры – перспективные материалы для получения высокопрочных и высокодолговечных изделий и конструкций - труб, колонн, плит водосбросов, элементов мостов, тоннелей, деталей градиринов, судов, морских сооружений и др.

*Полимерцементными* (цементно-полимерными) называются бетоны, модифицированные полимерными добавками, вводимыми в цементное тесто или бетонную смесь. В качестве полимерных добавок в цементных системах применяют:



- эластомеры – синтетические каучуки (бутадиенстирольный, хлоропреновый, дивинилстирольный и др.);
- термопласты (поливинилацетат, сополимеры винилацетата, поливинилхлоропрен и др.);
- реактопласты (эпоксидные, фурановые, полиэфирные и др.);
- водорастворимые смолы (диэтиленгликолевые, мочевиноформальдегидные, ацетоноформальдегидные и др.).

Дисперсии *эластомеров* и *термопластов* вводят обычно в количестве 10-20% от массы цемента, водорастворимые смолы – 1-3%. Для предотвращения коагуляции эластомеров при смешивании их с цементом необходимо введение стабилизаторов (гидрофильных коллоидов, электролитов). Водорастворимые смолы применяют без или с отвердителем и вводят в воду затворения.

Повышение прочности цементных бетонов на растяжение и их деформативности – один из главных результатов введения полимерных добавок. При введении, например, добавок поливинилацетата (ПВА) и латексов возможно увеличение прочности при изгибе в 2-3 раза. Отмечается также значительный рост предельной растяжимости и сцепления с поверхностью старого бетона и арматуры. В отличие от ПВА добавки водорастворимых смол положительно влияют на растяжимость как при сухих, так и при водных условиях твердения, хотя величина этого эффекта и менее значительна.

По сравнению с обычными бетоны этого вида характеризуются повышенной прочностью сцепления с различными основаниями.

Химическая стойкость бетонов, модифицированных добавками полимеров зависит от природы полимеров, полимерцементного отношения и свойств агрессивных химических веществ.

**Бетоны специального назначения.** Для изготовления конструкций и возведения сооружений, постоянно или периодически находящихся в воде применяются *гидротехнические бетоны*. необходимость в таких бетонах возникает при возведении гидроэнергетических, гидромелиоративных, транспортных сооружений, сооружений промышленной гидротехники, водоснабжения и канализации и др.

В зависимости от расположения гидротехнического бетона в сооружении по отношению к уровню воды он разделяется на *подводный* (находится в воде постоянно), *зоны переменного уровня воды*, *надводный* (рис. 11.29). Гидротехнические бетоны делятся также на *массивные* и *немассивные*. Массивные бетоны используются пре-

# 11. Композиционные материалы на основе вяжущих веществ

имущественно при строительстве плотин. Массивные конструкции требуют специальных мер для регулирования температурных напряжений, возникающих при выделении теплоты в бетоне.

Требования к гидротехническим бетонам предъявляются дифференцированно с учетом зонального распределения бетона в конструкциях (табл. 11.20).

Таблица 11.20

Требования к гидротехническому бетону по зонам

| Требования,<br>предъявляемые<br>к бетону | Массивные сооружения            |                    |           |                 |                    | Немассивные<br>сооружения |           |                    |           |
|------------------------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------|-----------------|--------------------|---------------------------|-----------|--------------------|-----------|
|                                          | Наружная зона                   |                    |           | Внутренняя зона |                    |                           |           |                    |           |
|                                          | Зоны относительного уровня воды |                    |           |                 |                    |                           |           |                    |           |
|                                          | подводная                       | переменного уровня | надводная | подводная       | переменного уровня | надводная                 | подводная | переменного уровня | надводная |
| Водостойкость                            | +                               | +                  | +         | +               | +                  | —                         | +         | +                  | +         |
| Водо-<br>непрони-<br>цаемость            | +                               | +                  | +         | +               | +                  | —                         | +         | +                  | +         |
| Морозо-<br>стойкость                     | —                               | +                  | +         | —               | —                  | —                         | —         | +                  | +         |
| Малое<br>тепло-<br>выделение             | +                               | +                  | +         | +               | +                  | +                         | —         | —                  | —         |

**Примечание.** Знак "+" означает, что требование предъявляется.

Особенно жесткий комплекс требований предъявляется к зонам переменного уровня воды и надводным зонам наружных частей массивных сооружений.

Комплекс проектных требований к гидротехническим бетонам обеспечивается выбором исходных материалов и добавок и проек-

тированием составов бетонных смесей в соответствии с условиями эксплуатации с учетом рекомендуемых ограничений по В/Ц и др.

В гидротехнических сооружениях при больших скоростях потока воды наступает кавитационное разрушение бетона. Сущность *кавитации* заключается в нарушении сплошности внутри текущей жидкости и образовании пузырей, разрыв которых сопровождается гидравлическим ударом. Многократно повторяющиеся удары и являются причиной кавитационного разрушения бетона.

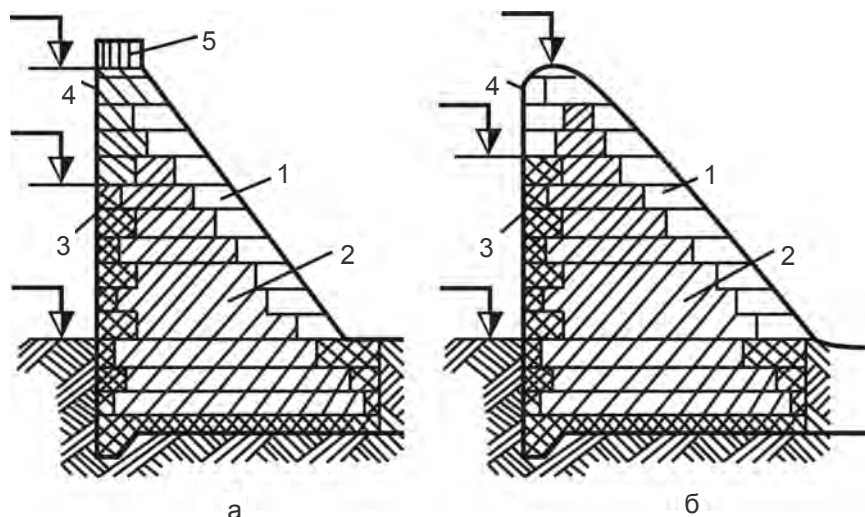


**Рис. 11.29.** Схемы плотин: а – глухая плотина; б – водосливная плотина; 1 – бетон наружной зоны; 2 – внутренней зоны; 3 – подводный; 4 – зоны переменного уровня; 5 – надводный

Для защиты от наносов и кавитации применяют защитные облицовки; в зависимости от условий могут быть использованы чугуно- и сталебетон, камень, металл, резина, полимерные бетоны. Особенно эффективными являются полимербетонные облицовки, стойкость к износу и кавитации которых в несколько раз выше, чем высокопрочных цементных бетонов.

*Дорожные бетоны* применяются для цементобетонных покрытий дорог и аэродромов. Они подвергаются воздействию многократно повторяющихся статических и динамических нагрузок от проходящих транспортных средств, а также комплексному влиянию окружающей среды – увлажнению и высушиванию, нагреванию и

охлаждению, замораживанию и оттаиванию с одновременным воздействием солей, применяемых для борьбы с гололедицей.

Бетонное покрытие дороги работает на изгиб как плита на упругом основании. Поэтому основным показателем механических свойств дорожных бетонов является прочность на растяжение при изгибе. Она назначается в зависимости от вида покрытия и положения слоя бетона в конструкции одежды дороги, а также интенсивности расчетной нагрузки.

Расчетное сопротивление бетона на растяжение при изгибе определяют по формуле:

$$R_{\text{ри}} = B_{\text{ив}} K_{\text{н.п.}} K_y K_F, \quad (11.35)$$

где  $B_{\text{ив}}$  – класс бетона на растяжение при изгибе;  $K_{\text{н.п.}}$  – коэффициент набора прочности; для бетона естественного твердения  $K_{\text{н.п.}} = 1,2$ , для пропаренного –  $K_{\text{н.п.}} = 1$ ;  $K_y$  – коэффициент усталости бетона при повторном нагружении;  $K_F$  – коэффициент, учитывающий воздействие попеременного замораживания и оттаивания, равный 0,95.

Коэффициент усталости  $K_y$  рассчитывают по формуле:

$$K_y = 1,08N^{-0.063}, \quad (11.36)$$

где  $N$  – суммарное число приложения приведенной расчетной нагрузки за расчетный срок службы.

Между прочностью цементного бетона на сжатие и растяжение при изгибе имеется устойчивая корреляционная связь (рис. 11.30).

Для тяжелого бетона ориентировочно прочность бетона на растяжение при изгибе  $R_{\text{р.и}}$  в зависимости от прочности на сжатие  $R_{\text{сж}}$  в МПа можно найти по формуле:

$$R_{\text{р.и}} = 0,08(10R_{\text{сж}})^{2/3}. \quad (11.37)$$

Прочность тяжелого цементного бетона при изгибе колеблется, как правило, в интервале 0,1-0,2 прочности при сжатии.

Соотношение  $R_{\text{сж}}/R_{\text{р.и}}$  повышается с увеличением прочности на сжатие. С увеличением возраста бетона его прочность при изгибе возрастает более медленно, чем прочность при сжатии и соотношение  $R_{\text{сж}}/R_{\text{р.и}}$  увеличивается. Существенное влияние на сопротивление бетона растяжению и изгибу оказывает вид заполнителей и характер их поверхности: прочность повышается при применении чистых заполнителей с угловатыми и шероховатыми зернами. Прочность при изгибе бетона на щебне на 15-20 % выше, чем бетона на гравии. Она увеличивается также при применении достаточно

прочных пористых заполнителей, что объясняется их хорошим сцеплением с цементным камнем.

Значительный эффект увеличения прочности бетона на изгиб достигается при применении полимерных добавок.

Важным показателем качества дорожного бетона является *износостойкость*, которая зависит от структуры и состава верхнего слоя дорожного покрытия. Износом называют свойство материала сопротивляться абразивным воздействиям. Его оценивают по величине

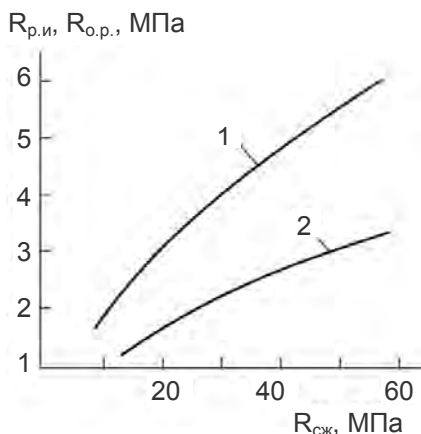


**Рис. 11.30.** Зависимость прочности бетона на растяжение при изгибе  $R_{p,и}$  (1) и осевое растяжение  $R_{o,р}$  (2) от прочности при сжатии  $R_{сж}$

не потерь массы образца при испытании во вращающемся барабане. Износ увеличивается при использовании подвижных бетонных смесей с большим водоцементным отношением. Износостойкость также снижается при твердении бетона в условиях низких температур и недостаточной влажности среды.

Нормативной характеристикой упругих свойств дорожных бетонов является *модуль упругости* в условиях растяжения при изгибе, определяемый при напряжениях, соответствующих 0,2 от разрушающих.

Трещиностойкость бетона в дорожной одежде в значительной мере определяется его усадочными деформациями. Возникающие при этом напряжения негативно влияют на морозостойкость, усталостную прочность и др.

Морозостойкость дорожного бетона устанавливают в зависимости от климатических условий по среднемесячной температуре наиболее холодного месяца в году: суровых ниже  $-15^{\circ}\text{C}$ , умеренных  $-5...-15^{\circ}\text{C}$  и мягких  $-0...-5^{\circ}\text{C}$  (табл. 11.21).

Влияние циклического изменения температуры усиливается дополнительным воздействием растворов солей.

Водоцементное отношение для бетона дорожных и аэродромных однослойных и верхнего слоя двухслойных покрытий должно быть

не более 0,50, а для нижнего слоя двухслойных покрытий – не более 0,60.

Таблица 11.21

## Марки бетона по морозостойкости в дорожном покрытии

| Конструктивный слой<br>дорожной одежды                              | Минимальные проектные марки<br>бетона по морозостойкости (F) для<br>районов со среднемесячной<br>температурой воздуха наиболее<br>холодного месяца, °С |              |          |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------|
|                                                                     | от 0 до -5                                                                                                                                             | от -5 до -15 | ниже -15 |
| Однослойное покрытие<br>или верхний слой двух-<br>слойного покрытия | 100                                                                                                                                                    | 150          | 200      |
| Нижний слой двух-<br>слойного покрытия                              | 50                                                                                                                                                     | 50           | 100      |
| Основание                                                           | 50                                                                                                                                                     | 50           | 50       |

Для футеровки топок в конструкциях газоходов, дымовых труб при строительстве тепловых электростанций, в элементах защитных стен и перекрытий АЭС применяют *жаростойкие бетоны*. Обычный тяжелый цементный бетон пригоден для изготовления строительных конструкций, подвергающихся длительному воздействию температуры лишь до 200°С. В зависимости от предельно допустимой температуры применения жаростойкие бетоны разделяют на классы – от 3 до 16 (предельная температура применения соответственно от 300 до 1600).

Выбор заполнителей для жаростойких бетонов зависит от максимальной температуры их эксплуатации. Заполнители из таких излившихся изверженных пород, не содержащих свободного кварца, как андезиты, диабазы, базальты, туфы, пемза при введении в бетонные смеси тонкомолотых добавок могут использоваться в условиях температуры до 700-800°С. В таком же диапазоне температуры используются доменные и топливные шлаки и бой обыкновенного глиняного кирпича.

Для легких жаростойких бетонов используют в качестве заполнителей керамзит, перлит, вермикулит.

Наибольшее распространение как заполнитель жаростойких бетонов получил *шамот*. К шамотным относятся материалы с содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$  от 30 до 45%. Их получают обжигом огнеупорных глин и каолинов до спекания. Обожженный продукт сортируют, измельчают и рассеивают по фракциям.

Для жаростойких бетонов с более высокой температурой применения в качестве заполнителей используют бой магнезитовых, хромомagneзитовых, корундовых и других огнеупоров. Для получения бетонов, работающих при температурах 600-1600°C в качестве вяжущего возможно применение жидкого стекла, 1300-1700° – глиноземистых и фосфатных цементов.

*Декоративные бетоны* применяют при отделке стен и других элементов зданий и сооружений, устройства полов. Вяжущими для них могут служить как белые и цветные, так и обычные цементы. В качестве вяжущих применяют также известь, гипс, каустические магнезит и доломит и др. Получение цементов светлых тонов осуществляют смешиванием обычного цемента с разбеливающими добавками (мелом, молотым известняком, мрамором и др.).

Заполнителями бетонов этого вида служат щебень и песок, полученные дроблением декоративных горных пород. Наряду с плотными применяют природные и искусственные пористые материалы с коэффициентом размягчения не менее 0,8. В качестве наполнителей используют тонкомолотые кварцевые пески, маршалит, каменную муку и др.

*Пигменты* для цветных цементов и декоративных бетонов должны иметь высокую стойкость к щелочам, солнечному свету и атмосферным воздействиям. Содержание пигментов в цементе и бетонной смеси зависит от их красящей способности (интенсивности), укрывистости, влияния на активность цемента.

Разновидностью цветных являются *мозаичные бетоны*. Их применяют для покрытия полов, изготовления таких строительных деталей как лестничные ступени, подоконники и др. Мозаичные смеси изготавливают с применением дробленой крошки из твердых полируемых пород (мрамора, гранита, базальта и т.д.).

*Электротехнические бетоны* – это специальные бетоны с заданными электрическими свойствами. Такие бетоны могут быть использованы для получения изделий разнообразных размеров и сложной формы, способных воспринимать механические и элект-

трические нагрузки. Электротехнические бетоны разделяют на две группы – электроизоляционные и электропроводные.

*Электроизоляционные* бетоны обладают высоким удельным электрическим сопротивлением, малым значением диэлектрических потерь, высокой диэлектрической проницаемостью, электрической прочностью. Они применяются для изготовления токоограничивающих реакторов, траверс линий электропередачи и других высоковольтных изолирующих конструкций. Наиболее простым способом получения бетона с улучшенными диэлектрическими свойствами является уменьшение его увлажняемости повышением плотности. Снижение электропроводности бетона в условиях естественной влажности достигается введением гидрофобизирующих и полимерных добавок. Наиболее надежная стабилизация электроизолирующих свойств бетона обеспечивается объемной пропиткой его в высушенном состоянии гидроизоляционными составами. Широко используется с этой целью петролатум. Для стабилизации электроизолирующих свойств цементных бетонов эффективна также пропитка высушенного бетона мономерами с последующей их полимеризацией термokatалитическим или радиационным способом.

Обычный цементный бетон в определенных температурно-влажностных условиях проводит электрический ток. Однако электрическое сопротивление бетона весьма нестабильно, при сезонных колебаниях температуры и влажности оно изменяется на 6-8 порядков. Для получения *электропроводных* бетонов с заданными электрическими свойствами можно использовать токопроводящие добавки – специальную сажу, графиты, тонкомолотый кокс, металлические шламы и др.

Бетон является эффективным материалом для биологической защиты ядерных реакторов, поскольку в нем удачно сочетаются при сравнительно низкой стоимости высокая плотность и содержание определенного количества водорода в химически связанной воде. Для уменьшения толщины защитных экранов при возведении атомных электростанций и предприятий по производству изотопов наряду с обычными применяют *особо тяжелые бетоны* со средней плотностью от 2500 до 7000 кг/м<sup>3</sup> и *гидратные бетоны* с высоким содержанием химически связанной воды. С этой целью используют тяжелые природные или искусственные заполнители: магнетито-



вые, гематитовые или лимонитовые железные руды, барит, металлический скрап, свинцовую дробь и др.

Для получения гидратных бетонов эффективными являются лимонит, серпентинит и другие материалы, обладающие наряду с высокой плотностью и значительным содержанием химически связанной воды. В качестве вяжущих в особо тяжелых и гидратных бетонах применяют портланд- и шлакопортландцемент. Возможно применение цемента специального назначения, образующих при твердении повышенное содержание гидросульфоалюмината, связывающего значительное количество воды.

Кроме улучшенных защитных свойств, бетон, применяемый для устройства экранов ядерных реакторов, должен обладать и другими особенностями: повышенной температуростойкостью, высокой теплопроводностью, низкими значениями усадки, коэффициента термического расширения и ползучести.

В результате воздействия ионизирующего излучения в структуре бетона могут происходить качественные изменения, характер и глубина которых зависят от свойств бетона, вида исходных материалов и дозы облучения. При определении радиационной стойкости материалов учитываются плотность потока частиц, интенсивность и поглощенная доза излучения.

**Легкие бетоны.** К легким относятся бетоны, средняя плотность которых не превышает  $2000 \text{ кг/м}^3$ . По структуре легкие бетоны подразделяют на плотные, поризованные, крупнопористые, по назначению – на *теплоизоляционные*, *конструкционно-теплоизоляционные* и *конструкционные* (табл. 11.22). Различают также специальные виды легких бетонов в соответствии с условиями их эксплуатации – жаростойкие, декоративные, химически стойкие и др.

Легкие бетоны изготавливают с применением пористых заполнителей. Наибольшее применение в строительстве получили конструкционно-теплоизоляционные легкие бетоны.

В наименовании легких бетонов указывается обычно вид крупного заполнителя (керамзитобетон, аглопоритобетон, шлакопемзобетон и др.). При необходимости может указываться дополнительно также вид мелкого заполнителя.

Марка крупного пористого заполнителя по насыпной плотности в  $\text{кг/м}^3$  для теплоизоляционного бетона не должна превышать 400. для конструкционного бетона – 1200. Максимальная марка порис-

# 11. Композиционные материалы на основе вяжущих веществ

того песка по насыпной плотности для теплоизоляционного бетона 400, конструкционно-теплоизоляционного – 1000.

Таблица 11.22

Характеристика основных видов легких бетонов  
(ГОСТ 25820-2000)

| Бетон                            | Марки по плотности, кг/м <sup>3</sup> | Классы по прочность при сжатии, МПа | Назначение                                  |
|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|
| Теплоизоляционные                | D300-D500                             | B0.35-B2                            | Для тепловой изоляции                       |
| Конструкционно-теплоизоляционные | D600-D1600                            | B2.5-B10                            | Для ограждающих конструкций зданий          |
| Конструкционные                  | D1100-D2000                           | B12.5-B40                           | Для несущих конструкций зданий и сооружений |

При выборе крупного пористого заполнителя учитывают допустимое соотношение между насыпной плотностью крупного пористого заполнителя и средней плотностью легкого бетона (табл. 11.23).

Таблица 11.23

Предельное отношение насыпной плотности крупного пористого заполнителя ( $\rho_{о.к}$ ) к средней плотности легкого бетона ( $\rho_{о.б}$ )

| Средняя плотность легкого бетона в Высушенном состоянии, кг/м <sup>3</sup> | Предельное отношение $\rho_{о.к}/\rho_{о.б}$ |                           |                                    |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
|                                                                            | Плотный легкий бетон                         | Малопесчаный легкий бетон | Беспесчаный (крупнопористый) бетон |
| До 800                                                                     | 0,4                                          | 0,55                      | 0,6                                |
| 900-1100                                                                   | 0,45                                         | 0,6                       | 0,65                               |
| 1200-1400                                                                  | 0,5                                          | 0,65                      | 0,7                                |
| 1500-2000                                                                  | 0,55                                         | 0,7                       | 0,75                               |

Наибольшая средняя плотность и прочность бетона достигаются при некотором оптимальном расходе воды (рис. 11.31). Этому же расходу воды отвечает и наименьший коэффициент выхода бетонной смеси, вычисленный по формуле:

$$\beta = \frac{V_{б.с.}}{V_{ц} + V_{п} + V_{щ}}, \quad (11.38)$$

где  $V_{б.с.}$  – объем бетонной смеси в уплотненном состоянии;  $V_{ц}$ ,  $V_{п}$ ,  $V_{щ}$  – объемы цемента, песка и крупного заполнителя в насыпном состоянии.

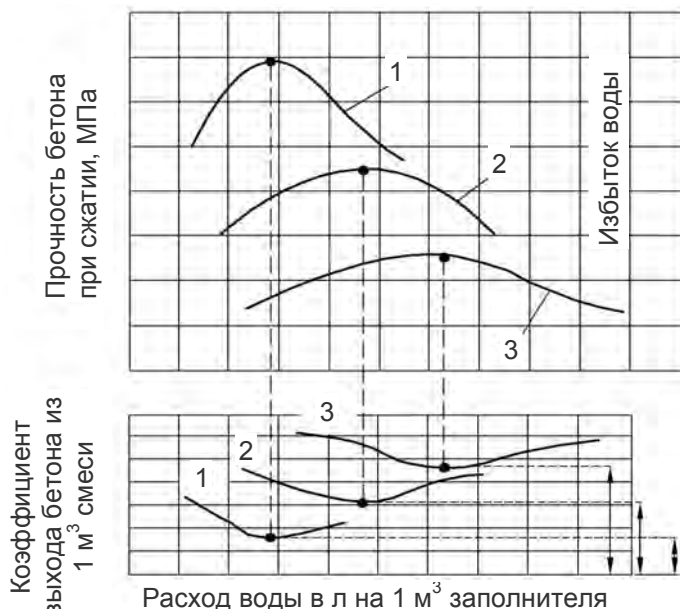


**Рис. 11.31.** Влияние расхода воды на прочность и коэффициент выхода легкого бетона:

1 – уплотнение сильное; 2 – среднее; 3 – слабое

Для легких бетонов характерно более высокое сцепление вяжущего с заполнителем. В бетонах этого вида толщина контактной зоны колеблется от 30 до 60 мкм, в то время как в тяжелых она составляет 25-50 мкм.

Развитая поверхность пористых заполнителей приводит к повышению внутреннего трения и соответственно водопотребности бе-

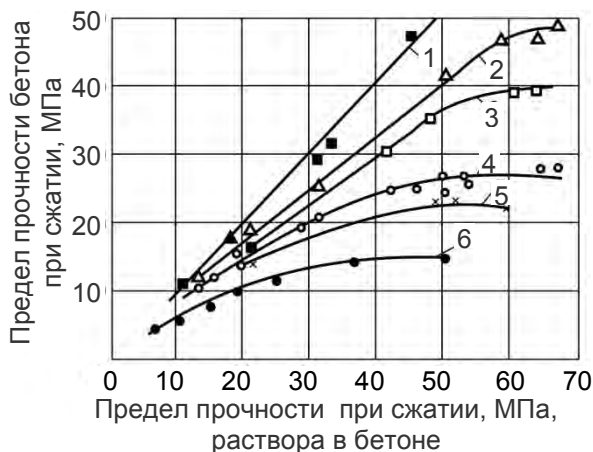


**Рис. 11.32.** Зависимость прочности при сжатии керамзитобетона от плотности заполнителей и прочности растворной части бетона: 1 – бетон на гранитном щебне (для сравнения); 2 – керамзитобетон на керамзитовом гравии с плотностью в куске  $\rho_k=1,4 \text{ т/м}^3$ ; 3 –  $\rho_k=1,05 \text{ т/м}^3$ ; 4 –  $\rho_k=0,86 \text{ т/м}^3$ ; 5 –  $\rho_k=0,66 \text{ т/м}^3$ ; 6 –  $\rho_k=0,52 \text{ т/м}^3$

тонных смесей. В результате интенсивного капиллярного поглощения воды зернами заполнителей легкобетонные смеси сравнительно быстро утрачивают подвижность.

Средняя плотность легких бетонов в сухом состоянии зависит от плотности зерен заполнителей, расхода цемента, объемной концентрации крупного заполнителя, объемов межзерновых пустот и вовлеченного воздуха.

Эффективным способом снижения средней плотности является поризация бетонной смеси воздухововлекающими или порообразующими добавками.

Для легких бетонов зависимость их прочности от прочности растворной части можно разделить на два участка (рис. 11.32). На относительно прямолинейном участке по мере увеличения прочности раствора имеет место пропорциональный рост прочности бетона. В этом интервале прочность бетона не зависит от прочности заполнителя. На втором криволинейном участке прочность легкого бетона определяется предельной деформативностью пористого заполнителя. Предельная прочность бетона уменьшается с уменьшением прочности пористого заполнителя.

Прочность легких бетонов скоррелирована с их плотностью. Большое влияние оказывает объем межзерновых пустот заполнителя, не заполненный цементным тестом.

Существенное влияние прочности пористого заполнителя приводит к меньшему относительному влиянию на прочность легкого бетона таких факторов как В/Ц и активность цемента. При неизменном качестве пористых заполнителей для увеличения прочности легких бетонов необходимо повышать прочность растворной составляющей (рис. 11.32), что достигается повышением расхода цемента или уменьшением объемной концентрации крупного заполнителя.

Теплопроводность легких бетонов зависит от теплофизических свойств пористого заполнителя, средней плотности и влажности бетона. Стеклосодержащие заполнители (шлаковая пемза, перлит и др.) позволяют на 10-20% при равной средней плотности уменьшить теплопроводность бетонов по сравнению с заполнителями, в структуре которых преобладает кристаллическая фаза (аглопорит, керамзит из запесоченных глин и др.).

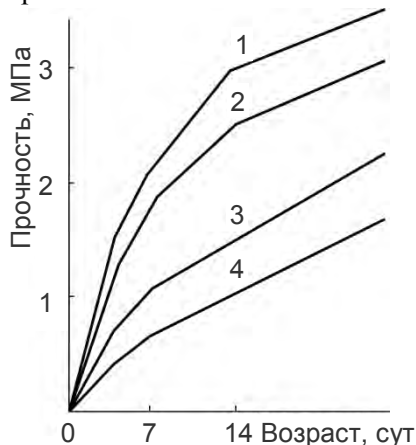


**Рис. 11.33.** Зависимость прочности арболита от породы древесины для заполнителя из: 1 – ели; 2 – сосны; 3 – березы; 4 – осины

По морозостойкости и водонепроницаемости для легких бетонов установлены марки; F25-F500 и W2-W12.

Наряду с легкими бетонами на неорганических пористых заполнителях в строительстве находят применение бетоны на основе органических заполнителей, получаемых преимущественно на основе отходов лесопиления или деревообработки, а также сельскохозяйственного производства.

Древесные отходы применяют или без предварительной переработки (опилки, стружка) или после измельчения (щепа, дробленка, древесная

шерсть). Легкие бетоны на основе древесных заполнителей характеризуются невысокой средней плотностью ( $\rho_0=300-800 \text{ кг/м}^3$ ) и теплопроводностью ( $\lambda=0,093-0,23 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$ ), а также хорошей обрабатываемостью. Прочной их в значительной мере зави-

сит от породы древесины, используемой в качестве заполнителя (рис. 11.33). Пропиткой древесных заполнителей минерализаторами и последующим смешиванием их с минеральными вяжущими обеспечивается биостойкость и трудносгораемость материалов на их основе. Недостатками бетонов на древесных заполнителях являются высокое водопоглощение и сравнительно низкая водостойкость.

Главным представителем группы бетонов на древесных заполнителях и минеральных вяжущих является *арболит* (раздел 12). К бетонам на основе органических заполнителей относится также *полистиролбетон*, заполнителем для которого является вспененный полистирол. Для этого вида легких бетонов установлены марки по средней плотности в сухом состоянии D150-D600, классы по прочности на сжатие от B0,5 до B2,5. Его применяют в виде плит и блоков, в основном, для теплоизоляции стен и других элементов зданий и сооружений.

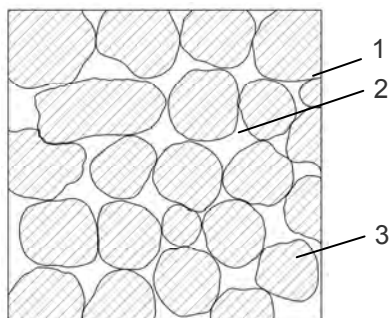


**Рис. 11.34.** Схема структуры крупнопористого бетона:

1 – прослойка цементного камня; 2 – поровое пространство; 3 - заполнитель

Особым видом легких бетонов является *крупнопористый* бетон, получаемый при отсутствии в составе бетонной смеси песка и ограниченном расходе цемента, достаточном лишь для обволакивания зерен крупного

заполнителя (рис. 11.34). Для получения крупнопористого бетона применяют как легкие пористые заполнители, так и обычные тяжелые гравий или щебень. Наряду с другими видами легких бетонов крупнопористый бетон может быть использован как материал для монолитных и сборных стеновых конструкций, а также для дренажных систем и фильтров.

Средняя плотность крупнопористого бетона может изменяться от 400 до 2000 кг/м<sup>3</sup>, прочность зависит как от количества, так и прочности содержащегося в нем цементного камня. Последняя определяется в основном активностью цемента и водоцементным отношением. Прочность крупнопористого бетона при сжатии соответ-

ствует классам В3,5-В7,5, при более высокой чем у соответствующих плотных бетонов прочности при растяжении, теплопроводность его в зависимости от плотности находится в пределах 0,26-0,99 Вт/м°С.

При использовании гравия при заданном расходе цемента, как правило, возрастает прочность и однородность по свойствам крупнопористого бетона. С другой стороны, применение щебня, учитывая его большую пустотность, позволяет получить более легкий бетон.

Для бетона данного вида характерна незначительная усадка, учитывая относительно невысокое содержание цементного камня.

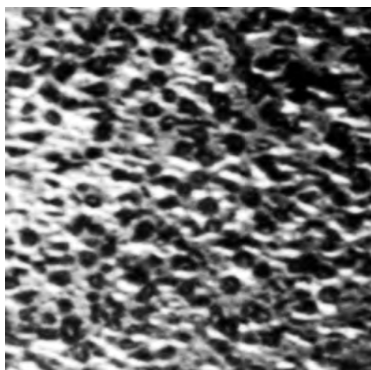


**Рис. 11.35.** Структура ячеистого бетона

Регулируя крупность и зерновой состав заполнителя, можно изменять коэффициент фильтрации в пределах 0,2-0,25 см/с. Морозостойкость крупнопористых бетонов при использовании различных заполнителей составляет 50-100 циклов.

В отличие от крупнопористого *поризованный легкий бетон* имеет пористую структуру, образованную поризующим компонентом. По своим свойствам этот вид легкого бетона занимает

промежуточное место между бетоном плотной структуры и ячеистым бетоном. Поризация легкогобетонной смеси позволяет применять без увеличения плотности более тяжелый пористый заполнитель, снизить расход или полностью отказаться от применения пористого песка, использовать заполнитель с прерывистой гранулометрией. Для поризованных бетонных смесей характерны повышенная связность и удобоукладываемость.

Поризация бетонов производится пеной, газом или воздухововлекающей добавкой. Пеной поризуются, как правило, беспесчаные смеси, воздухововлекающими добавками – смеси с песком, газом – как с песком, так и без него.

**Ячеистые бетоны.** Бетоны этого вида характеризуются равномерно распределенными порами в виде сферических ячеек, диаметр

которых, как правило, составляет 1-3 мм. Объем пор в ячеистых бетонах достигает 80-85% (рис. 11.35).

Различают *газобетоны*, получаемые смешиванием вяжущего, воды и кремнеземистого компонента с газообразователем (алюминиевой пудрой, перекисью водорода и др.) и *пенобетоны*, получаемые при смешивании аналогичной смеси с пеной. Газобетон был предложен в 1889 г. чешским исследователем Гоффманом, применившим для вспучивания растворов углекислый газ. В 1914 г. Аулсворт и Дайер (США) получили патент на использование порошков алюминия и цинка для образования пузырьков водорода в цементном тесте, заложив принципиальные основы современной технологии газобетона. В 1923 г. датский инженер Байер изобрел пенобетон. В настоящее время интенсивно развивается производство как *газо-*, так и *пенобетонов* автоклавного и неавтоклавного твердения. Вяжущими для производства ячеистых бетонов служат как клинкерные, так и бесклинкерные цементы, известь, гипс.

При использовании известково-кремнеземистых вяжущих автоклавного твердения ячеистые бетоны называют *газо-* или *пеносиликатами*.

Ячеистые бетоны относятся к наиболее эффективным материалам для ограждающих конструкций. При плотности 500-700 кг/м<sup>3</sup> они позволяют достигать при оптимальной структуре прочность 3-5 МПа. Основными факторами повышения прочности ячеистых бетонов при сохранении их плотности являются более высокая тонкость помола компонентов и подбор их гранулометрии, тщательное смешивание, выбор оптимальных составов смесей и режима твердения.

Кремнеземистым компонентом служит, как правило, молотый кварцевый песок или зола ТЭС. Применяют также доменные и другие металлургические шлаки, трепел, диатомит, опоку и др.

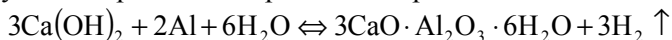
Ячеистые бетоны в зависимости от назначения, так же как и легкие бетоны на пористых заполнителях разделяют (ГОСТ25485-89) на *теплоизоляционные* (марка бетона по средней плотности D300-D500, классы по прочности на сжатие B0,5-B1), *конструкционно-теплоизоляционные* (D600-D900; B1,5-B10) и *конструкционные* (D1000-D1200; B10-B15).

Вид вяжущего выбирают с учетом условий твердения и структурообразования ячеистых бетонов. При твердении в нормальных ус-



ловиях возможно использование алитовых низко- и среднеалюминатных цементов, шлакощелочных вяжущих. Нежелательно применение цементов с добавками трепела, глиежей, трассов, опоки. В производстве ячеистых бетонов, твердеющих при автоклавной обработке, широко применяют известково-шлаковые и известково-золевые вяжущие, гидравлическая активность которых особенно проявляется с повышением температуры и давления водяного пара. Автоклавная обработка дает возможность использовать в качестве сырья инертные или малоактивные при нормальном твердении кислые, низкоглиноземистые как гранулированные, так и отвальные шлаки и золы.

Наиболее распространенным газообразующим компонентом служит алюминиевая пудра. Введение пудры обеспечивает начало газовыделения в щелочной среде через 1-2 мин. Наряду с пудрой, вводимой в смесь в виде водной суспензии, применяют алюминиевую пасту. Газообразование проходит по реакции:



В результате химической реакции из 1 г. алюминия выделяется при нормальных условиях 1,254 л. водорода, при 50<sup>0</sup>С объем водорода составляет 1,48 л.

Схватывание массы должно происходить желательнo сразу после вспучивания, в противном случае давление газа на стенки пор вызывает ее растрескивание. При недостаточной пластической прочности массы к моменту прекращения вспучивания происходит ее осадка.

Газобетонные изделия изготавливают с применением литейной, резательной и вибрационной технологии. При литейной технологии изделия формуют из жидкотекучих смесей, содержащих до 50-60% воды от массы сухих компонентов. Такие смеси часто обладают недостаточной газодерживающей способностью, что ухудшает структуру бетона.

*Вибрационная технология* позволяет уменьшить водотвердое отношение смесей и интенсифицировать процесс вспучивания за счет тиксотропии и ускорения газовыделения. Положительный эффект достигается при применении вибрирования смеси сначала в процессе приготовления смеси в вибросмесителях, а затем после заливки в формах на виброплощадках.

При широко применяемой на заводах ячеистых бетонов *резательной технологии* формирования изделий отформованный ячеистобетонный массив, обладающий некоторой минимальной прочностью, разрезается на плиты или блоки соответствующих размеров, поступающие на тепловлажностную обработку.

Традиционная технология приготовления пенобетона включает приготовление пены, растворной смеси и пенобетонной массы. Реализация такой технологии осуществляется в пенобетонномешалке, состоящей из двух или трех барабанов (рис. 11.36). Пену при этом готовят интенсивным взбиванием водного раствора пенообразователя.

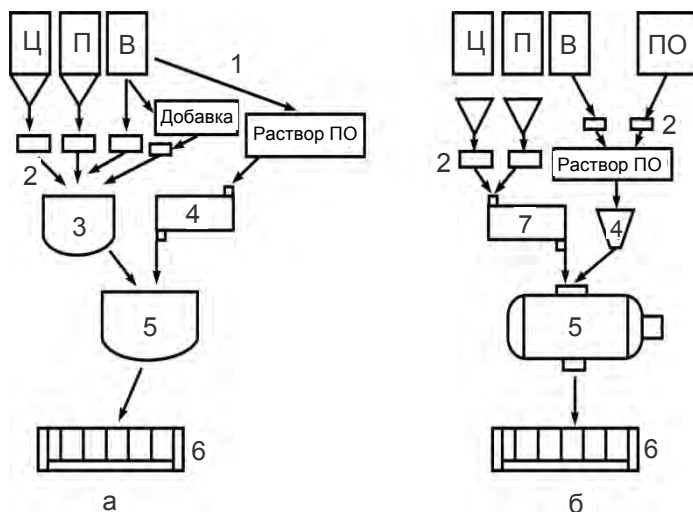


**Рис. 11.36.** Технологические схемы производства пенобетонных изделий: а – традиционный метод; б – метод сухой минерализации;

1 – бункеры сырьевых материалов (цемента, песка, воды);  
 2 – дозаторы; 3 – смеситель для приготовления растворной смеси;  
 4 – пеногенератор; 5 – смеситель для приготовления пенобетонной смеси; 6 – форма; 7 – смеситель сухих компонентов;  
 ПО – пенообразователь

Поризация бетонной смеси предварительно приготовленной пеной может осуществляться также методом сухой минерализации пены (рис. 11.36), при котором низкократная пена минерализуется

сухими компонентами по мере их постепенного добавления к пеномассе при одновременном перемешивании в смесителе.

Приготовление пенобетонной смеси без предварительного приготовления пены осуществляют методом аэрирования (рис. 11.37), основанным на втягивании воздуха массой, содержащей пенообразователь, при скоростном перемешивании в смесителе. Этот метод

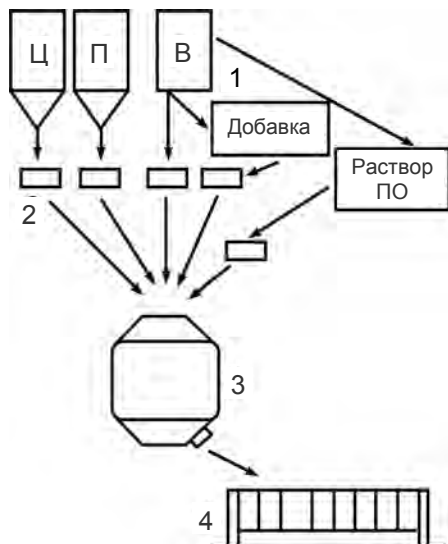


**Рис. 11.37.** Технологическая схема изготовления пенобетонных изделий с использованием метода аэрирования бетонной смеси:

1 – расходные бункеры сырьевых материалов (цемента, песка, воды);  
2 – дозаторы; 3 – скоростной смеситель; 4 – форма для формования пенобетонных изделий; ПО – пенообразователь

позволяет отказаться от применения специального пеногенератора.

Наиболее высокие технические свойства ячеистых бетонов при рациональном использовании вяжущих материалов в том числе на основе шлаков, зол и других промышленных отходов достигаются при тепло-влажностной обработке в автоклавах. Автоклавная технология в настоящее время наиболее характерна для газобетонов. Изделия запаривают обычно при давлении 0,8-1,2 МПа при общей продолжительности 10-17 ч. Наряду с автоклавной обработкой для изделий на основе цемента или доменных шлаков применяют пропаривание или электропрогрев. По безавтоклавной технологии изготавливают преимущественно мелкоштучные блоки из пенобе-

тона при повышенном расходе портландцемента.

Плотность бетонов зависит от плотности материала межпоровых стенок и объема пор (пустот), образованных в результате поризации и водовяжущего отношения.

Свойства ячеистых бетонов улучшаются по мере оптимизации их пористой структуры за счет различных технологических приемов, применения высокопрочных эффективных вяжущих, дисперсного армирования волокнистыми добавками, использования скоростных вибро- и гидродинамических смесителей и др.

### 11.3. Армированные композиционные материалы

Материалы данной группы объединяет наличие в их составе армирующего компонента, воспринимающего в значительной мере растягивающие и изгибающие напряжения, возникающие в изделиях при эксплуатации. Армирующие элементы материалов различают по их химическому и вещественному составу, форме, размерам, степени ориентированности в матричной фазе.

Основным представителем композиционных материалов (композитов) армированных непрерывными волокнами, является железобетон. К дисперсноармированным материалам можно отнести фибробетоны и асбестоцемент.

**Железобетон.** Железобетон – композиционный строительный материал, полученный армированием бетона стальной арматурой. Идея получения железобетона, первые патенты на который были получены французским инженером Монье в 1867-1870 гг., основана на возможности существенного увеличения допустимых растягивающих напряжений в бетонных конструкциях при их армировании.

Бетон сопротивляется растяжению в 15-20 раз слабее, чем сжатию. Даже при сравнительно небольших растягивающих напряжениях не представляется полностью использовать прочность бетона из-за наличия в нем микротрещин, вызванных колебаниями температуры, неравномерным высыханием и пр. При разрушении бетонных балок под действием растягивающих усилий несущая способность их сжатой зоны используется не более чем на 5-7%.

В железобетоне бетон в основном предназначен для восприятия сжимающих усилий, а стальная арматура – растягивающих (рис. 11.38). Балки с размещенной в них стальной арматурой имеют несущую способность до 20 раз большую, чем неармированные.

Совместная работа бетона и стальной арматуры в железобетоне как едином материале обусловлена тремя факторами:

- высоким сцеплением бетона и стали;
- близостью их коэффициентов линейного термического расширения при температурах до 100°C;
- высоким уровнем защищенности стальной арматуры от коррозии в среде плотного цементного бетона.

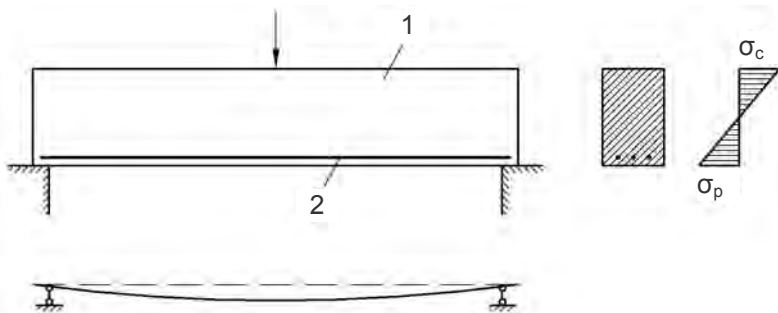


**Рис. 11.38.** Схема работы арматуры в железобетонном элементе: 1 – бетонный элемент; 2 – арматурный стержень

Железобетон является основным современным конструкционным материалом. Практически во всех областях строительства железобетонные конструкции находят самое широкое применение (рис. 11.39, 11.40).

Железобетонные конструкции изготовляют сборными, монолитными и сборно-монолитными. *Сборные конструкции* возводят на строительной площадке из заранее заготовленных элементов, *монолитные* изготавливают непосредственно на строительной площадке, а *сборно-монолитные* являются комплексными, в которых сборный и монолитный железобетон работают под нагрузкой совместно.

Широкому применению железобетона в строительстве способствуют ряд достоинств этого материала к числу которых можно отнести высокую надежность и долговечность, возможность механизированного и автоматизированного изготовления и монтажа, применения в значительном количестве местных материалов как компонентов бетонной смеси.

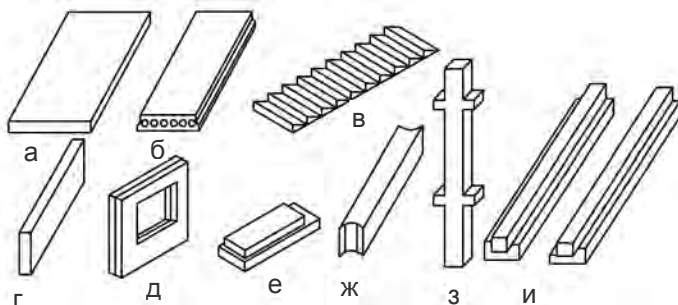


**Рис. 11.39.** Схемы железобетонных изделий для жилых и общественных зданий: а – панель перекрытия без пустот; б – панель перекрытия с круглыми пустотами; в – лестничный марш; г – прогон; д – стеновая панель; е – лестничная площадка; ж – ригель; з – балка; и – колонны

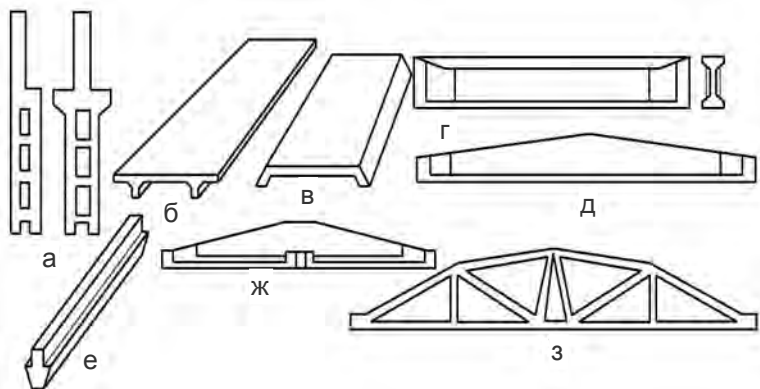


**Рис. 11.40.** Схемы железобетонных изделий для промышленного строительства: а – колонны; б – панель перекрытия типа "двойное Т"; в – плита покрытия; г – подкрановая балка; д – двускатная стропильная балка; е – ригель; ж – подстропильная балка, з – ферма

Вместе с тем при использовании железобетона необходимо учитывать его недостатки и прежде всего повышенную массу конструкций и их материало- и энергоемкость. К настоящему времени разработан ряд направлений повышения эффективности использо-

вания железобетона в строительстве, основанных на прогрессивных, проектных и технологических решениях, применении эффективных видов бетона и арматуры.

Арматурой служат гибкие или жесткие стальные стержни, размещенные в массе бетона в соответствии с эпюрами изгибающих элементов, поперечными или продольными силами, действующими на конструкцию в стадии ее эксплуатации.

*Гибкая арматура* имеет вид отдельных стальных стержней и проволоки или разнообразных изделий из них (сетки, каркасы, канаты, пакеты, пучки) (рис. 11.41). *Жесткая арматура* представлена швеллерами, двутаврами, уголками. Ее используют в монолитных конструкциях высотных каркасных зданий, в большепролетных перекрытиях и покрытиях. Наибольшее распространение получила гибкая арматура.

Арматуру подразделяют по функциональному назначению на рабочую, конструктивную (распределительную) и монтажную. Основной является *рабочая арматура*, предназначенная для восприятия растягивающих, а иногда и сжимающих усилий. Арматура воспринимает также усадочные и температурные напряжения в элементах конструкций.

В зависимости от способа изготовления арматуру подразделяют на горячекатанную стержневую, холоднотянутую проволочную и термически упрочненную гладкую и периодического профиля, напрягаемую и ненапрягаемую.

Важными свойствами арматурной стали являются пластичность, свариваемость, прочностные характеристики, хладноломкость, усталостное разрушение.

*Пластичность* характеризуется относительным удлинением стальных стержней при разрыве. Понижение пластических свойств может явиться причиной хрупкого разрыва арматуры в конструкциях под нагрузкой.

*Свариваемость* арматурных сталей определяет способность их к надежному соединению арматурных стержней при механизированном изготовлении арматурных изделий, выполнении стыков, анкеров, изготовлении закладных деталей и т.п. Хорошо свариваются горячекатаные малоуглеродистые и низколегированные арматурные стали.

Под прочностными характеристиками арматуры понимают физический  $\sigma_y$  и условный  $\sigma_{0.2}$  *предел текучести*, а также *временное сопротивление*  $\sigma_b$ . Их устанавливают по диаграмме  $\sigma$ - $\epsilon$ , полученной при испытании образцов арматуры на растяжение. В точке диаграммы, соответствующей физическому пределу текучести  $\sigma_t$ , пластические деформации стали начинают расти без увеличения внешней нагрузки. Величина предела текучести стали снижается при действии многократно повторяющейся нагрузки. При этом разрушение приобретает хрупкий характер.

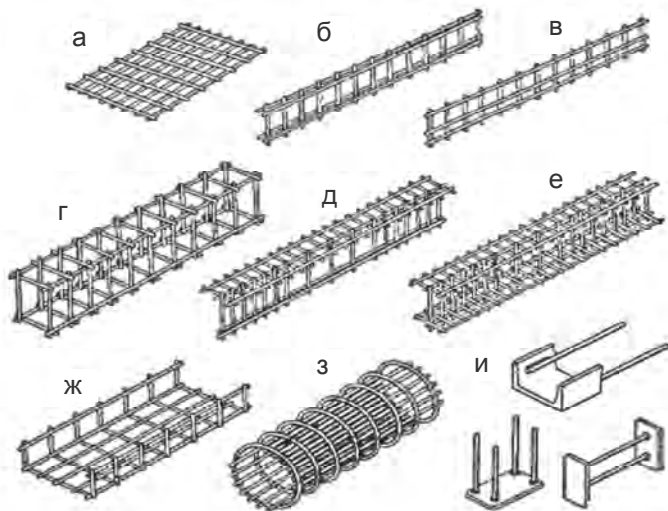


**Рис. 11.41** Арматурные изделия заводского изготовления: а – плоская сетка; б, в – плоские каркасы; г – пространственный каркас; д – пространственный каркас таврового сечения; е – пространственный каркас двутаврового сечения; ж – гнутая сетка; з – гнутая сетка криволинейного сечения; и – закладные детали

Стали с выраженной площадкой текучести называют *мягкими*. Для *твердых* сталей, к которым относится стержневая арматура повышенной прочности, на диаграмме  $\sigma$ - $\epsilon$  четкие значения предела упругости и текучести не характерны. Для таких сталей используют понятия *условных пределов упругости* ( $\sigma_{0.02}$ ) и *текучести* ( $\sigma_{0.2}$ ). Под первым понимают напряжение, при котором возникают остаточные



относительные деформации равные 0,02% от предельных остаточных деформаций. За условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  принимают напряжение, соответствующее остаточным деформациям 0,2%.

Изготавливают стержневую (А) и проволочную (В) арматуру, а также арматурные канаты (К).

Стержневая арматурная сталь подразделяется на: горячекатаную класса А-I; периодического профиля классов А-II, А-III, А-IV, А-V, А- VI; термически и термомеханически упрочненную периодического профиля классов Ат –III, Ат- IV, Ат-V, Ат-VI. В обозначении классов термически и термомеханически упрочненной стержневой арматуры повышенной стойкости к коррозионному растрескиванию под напряжением добавляется буква К, свариваемой – С, свариваемой и стойкой к коррозионному растрескиванию под напряжением – буквы СК. Если горячекатанная стержневая сталь упрочнена вытяжкой это также указывается в ее обозначении (например, Ат – IIIв). Механические свойства стержневой арматурной стали приведены в табл. 11.24.

В зависимости от класса стержневая арматура выпускается диаметром от 6 до 40 мм, проволочная от 3 до 8 мм, арматурные канаты изготавливают диаметром от 6 до 15 мм. Изготовление арматурных элементов включают в себя механическую обработку арматурных сталей (зачистку, правку, резку и др.), сварку сеток и плоских каркасов, сборку из них пространственных каркасов.

Одним из широко используемых приемов повышения эффективности железобетона является *предварительное натяжение* (натяжение) арматуры. Обычное армирование, хотя и увеличивает несущую способность конструкций, имеет ограниченные возможности, обусловленные незначительной растяжимостью бетона 0,1-0,15 мм/м. Предельная растяжимость бетона в сотни раз ниже предельной растяжимости стальной арматуры, поэтому при совместном растяжении со сталью цельность бетона сохраняется лишь в начальный период эксплуатации. При нагрузках, составляющих 15-25% от необходимых для разрушения бетона, в растянутой зоне конструкций появляются трещины. С увеличением внешней нагрузки начинается активный процесс развития трещин, увеличиваются прогибы, в трещины проникают влага и газы, создается опасность коррозии стальной арматуры.

## Механические свойства стержневой арматурной стали

| Класс арматурной стали | Предел текучести физический или условный, МПа | Временное сопротивление, Н/мм <sup>2</sup> | Относительное удлинение после разрыва |                | Испытание на изгиб в холодном состоянии (С- толщина оправки; d-диаметр стержня) |
|------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                        |                                               |                                            | полное, %                             | равномерное, % |                                                                                 |
| A-I (A240)             | 235                                           | 375                                        | 25                                    | -              | 180°; C = 1d                                                                    |
| A-II (A300)            | 295                                           | 490                                        | 19                                    | -              | 180°; C = 3d                                                                    |
| At-III (At300)         | 295                                           | 440                                        | 25                                    | -              | 180°; C = 1d                                                                    |
| A-III (A400)           | 390                                           | 590                                        | 14                                    | -              | 90°; C = 3d                                                                     |
| AtIII (At400)          | 400                                           | 500                                        | 16                                    | -              | 90°; C = 3d                                                                     |
| A500C                  | 500                                           | 600                                        | 14                                    | -              | 90°; C = 3d                                                                     |
| AIY 9A600)             | 590                                           | 885                                        | 6                                     | 2              | 45°; C = 5d                                                                     |
| AtIV (At600)           | 600                                           | 800                                        | 12                                    | 4              | То же                                                                           |
| AtVK (At600K)          | 600                                           | 800                                        | 12                                    | 4              | "-                                                                              |
| A-Y (A800)             | 785                                           | 1030                                       | 7                                     | 2              | "-                                                                              |
| At-V (A800)            | 800                                           | 100                                        | 8                                     | 2              | "-                                                                              |
| A-VI (A1000)           | 980                                           | 1230                                       | 6                                     | 2              | "-                                                                              |
| At-VI (At1000)         | 1000                                          | 1250                                       | 7                                     | 2              | "-                                                                              |
| At-VII (At1200)        | 1200                                          | 1450                                       | 6                                     | 2              | "-                                                                              |

**Примечание.** С механическими свойствами идентичными арматуре классов AtIV (At600), At-V (A800) и At-VI (At1000) изготавливают арматуру классов AtIVC (At600), At-VK (A800) и At-VIK (At1000K).

Необходимость предотвращения раскрытия трещин выше допустимого предела (обычно более 0,4 мм) приводит к ограничению возможных напряжений в арматуре (в арматуре с периодическим профилем не более 590 МПа). Это в свою очередь не позволяет использовать в обычно армированном железобетоне высокопрочные виды арматуры и бетона, приводит к увеличению массы конструкций, ограничивает величину перекрываемых пролетов.

Возможности железобетона как конструктивного материала существенно расширяются при использовании предварительного напряжения бетона посредством обжатия его предварительно натянутой арматурой повышенной прочности (рис. 11.42). После изготовле-

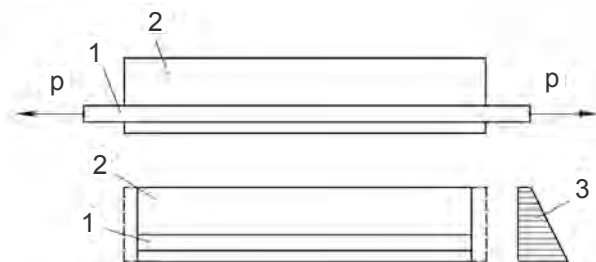


**Рис. 11.42.** Схема предварительного напряжения арматуры: 1 – арматура; 2 – бетонный элемент; 3 – эпюра напряжений

ния конструкции и затвердевания бетона до необходимой т.н. предаточной прочности арматуру освобождают от натяжения и она, сокращаясь, вызывает сжатие бетона. В результате предельная растяжимость бе-

тона в конструкции под действием эксплуатационных нагрузок как бы увеличивается, поскольку деформации от предварительного сжатия суммируются с деформациями растяжения. В таком предварительно сжатом бетоне трещины появляются только в том случае, если растягивающие напряжения превысят напряжения предварительного сжатия. Предварительное обжатие бетона арматурой значительно превосходит его предельную растяжимость, в результате трещиностойкость конструкций увеличивается в 2-3 раза.

Деформации растяжения предварительно напряженного бетона становятся соизмеримыми с деформациями высокопрочной арматуры, возможность армирования ею конструкций в среднем до 50% сокращает расход стали. Предварительное напряжение конструкций

позволяет снизить их массу, увеличить перекрываемые пролеты в зданиях и сооружениях и их выносливость.

При производстве сборных железобетонных изделий предварительное напряжение может производиться до затвердевания бетона, и после приобретения им определенной прочности. Первый способ (“натяжение на упоры”) более распространен. Сущность его заключается в том, что уложенная в форму арматура закрепляется на упорах и натягивается. Освобождается от натяжения арматура после заполнения формы бетонной смесью и затвердевания бетона. При втором способе (“натяжение на бетон”) арматура располагается в специально оставленных в бетоне каналах и натягивается после его затвердевания. Необходимое сцепление натянутой арматуры с бетоном достигается с помощью инъектирования в каналы конструкции цементного раствора. В обоих случаях освобожденная от натяжения арматура стремится вернуться в первоначальное положение, сокращается и обжимает железобетонные элементы.

Надежное сцепление с бетоном достигается при использовании арматуры с периодическим профилем, витой арматуры, а также арматуры, на концах которой устанавливают дополнительные анкерные устройства.

Натяжение арматуры осуществляют механическим, электротермическим и химическим способами. *Механическое натяжение* арматуры производят гидродомкратами и другими устройствами; *электротермическое* основано на использовании линейного расширения арматуры при ее нагреве электрическим током, а *химическое* – на применении напрягающих цементов, имеющих высокую энергию расширения. При *электротермомеханическом* натяжении арматура натягивается механическим устройством и одновременно нагревается электрическим током.

Различают линейное и непрерывное напряженное армирование. При *линейном армировании* укладывают отдельные элементы в виде стержней, пучков, прядей, соединенных в определенном порядке, а *при непрерывном* – арматурный каркас, получаемый наматыванием непрерывной проволоочной нити на специальные упоры или на конструкцию.

Кроме увеличения несущей способности бетонных элементов и повышения трещиностойкости бетона при предварительном напря-

жении, арматура в значительной мере влияет и на ряд других свойств железобетона (рис. 11.43).

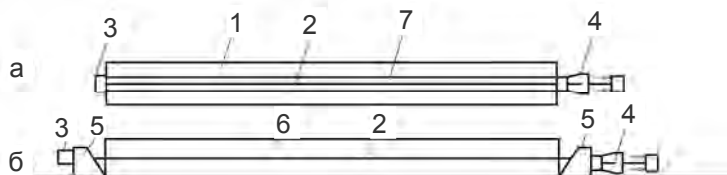


**Рис. 11.43.** Схема изготовления предварительно напряженных элементов: а – с напряжением арматуры на бетон; б – с напряжением арматуры на упоры; 1- затвердевший бетонный элемент; 2 – арматура; 3 – анкер; 4 – домкрат; 5 – упор

Надежно сцепляясь с бетоном, стальная арматура препятствует свободным усадке и набуханию, а также уменьшает ползучесть бетона. Усадка и набухание железобетона могут быть почти вдвое меньше чем усадка и набухание бетона (рис. 11.44). Стесненная деформация усадки бетона приводит к появлению в железобетонных элементах напряжений – растягивающих в бетоне и сжимающих в арматуре. Растягивающие напряжения в бетоне увеличиваются с увеличением содержания арматуры. При достижении напряжениями в бетоне величины его прочности при растяжении возникают усадочные трещины. Для уменьшения дополнительных усилий от усадки железобетонные конструкции большой протяженности делят усадочными швами на блоки.

Стальная арматура обладает модулем упругости, в 10-20 раз превышающем модуль деформации бетона.

При пластических деформациях бетона арматура испытывает только упругие деформации и, воспринимая часть нагрузки, разгружает бетон, задерживая деформации ползучести. Вследствие ползучести бетона при 0,5% армирования напряжения в арматуре через 150 сут. возрастают более чем в 2,5 раза.

В железобетонных конструкциях усадка и ползучесть железобетона действуют одновременно, влияя на их работу под нагрузкой. В сжатых элементах они уменьшают напряжения в бетоне и увеличивают их в арматуре, в изгибаемых – усадка увеличивает напряжение в бетоне сжатой зоны, а в растянутой арматуре уменьшает, а ползучесть – наоборот.

Под воздействием температуры в результате различия коэффициентов термического расширения цементного камня, зерен заполнителя и стальной арматуры в железобетоне возникают внутренние напряжения. В условиях систематического воздействия температур 60-200°C они вызывают снижение прочности примерно на 30%, а при 500-600°C – разрушение бетона.

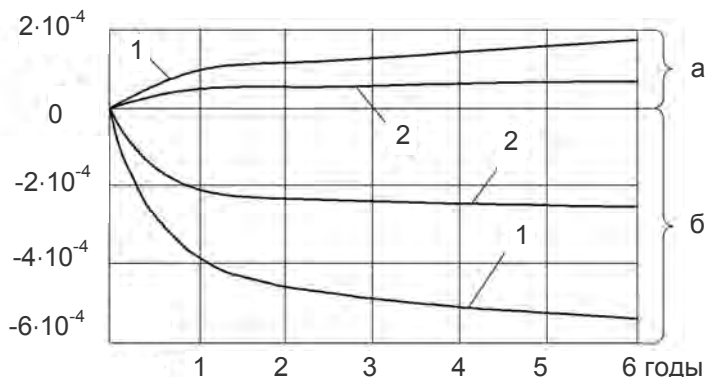


**Рис. 11.44.** Кривые усадки и набухания бетонных неармированных (1) и армированных (2) образцов:  
а – набухание в воде; б – усадка в воздухе

Щелочной характер среды твердеющего бетона является благоприятным фактором для защиты арматуры и вызывает “пассивацию” поверхности стали. Однако при высокой пористости бетона пассивация арматурной стали нарушается в результате проникновения углекислого и других кислых газов из окружающей среды. Наиболее интенсивно протекает процесс коррозии арматуры при влажности более 80%. В плотном бетоне при 100%-ной влажности коррозия арматуры практически не происходит. Затухает коррозионный процесс также в воздушно-сухих условиях. Высокоагрессивной средой для арматуры является влажный и жаркий климат морских районов с насыщенным солями воздухом. Коррозию арматуры могут вызвать также хлористые соли, вводимые в бетон для ускорения твердения. Их разрешается использовать лишь для железобетонных конструкций с ненапряженной рабочей арматурой диамет-

ром более 5 мм, предназначенных для эксплуатации в неагрессивных газовых и водных средах.

Коррозионная стойкость стали уменьшается при повышенном содержании углерода. Процессы коррозии, сопровождаемые снижением пластических свойств стали, особенно интенсивно протекают в напряженной арматуре.

Основными средствами предотвращения коррозии арматуры в бетоне являются обеспечение высокой плотности и необходимой толщины защитного слоя, которые назначаются с учетом влажности и агрессивности среды. При использовании поризованных и ячеистых бетонов арматуру защищают коррозионно-стойкими покрытиями (цементно-битумными, цементно-полистирольными и др.).

Производство железобетонных изделий складывается из: приготовления бетонной смеси; изготовления арматурных элементов; формования изделий; твердения бетона; освобождения изделий из форм, их отделки, сборки и комплектования строительных деталей для повышения их заводской готовности.

Процесс формования включает операции подготовки форм, армирования, укладки и уплотнения бетонной смеси. В зависимости от принятой технологии для уплотнения и формования изделий применяют вибрирование, прессование, ударно-импульсное уплотнение, центрифугирование, вакуумирование и их различные комбинации. Наиболее распространено виброформирование изделий и конструкции. Технологические процессы изготовления сборных железобетонных изделий осуществляются на поточных линиях в перемещаемых или неподвижных формах. В первом случае формы при изготовлении изделий перемещаются от одного специализированного технологического поста (например, укладки и уплотнения бетонной смеси, натяжения арматуры и др.) к другому, а во втором случае формы в течение всего производственного процесса неподвижны, перемещается необходимое технологическое оборудование.

Изготовление изделий в перемещаемых формах осуществляется на поточно-агрегатных, полуконвейерных и конвейерных технологических линиях.

*Поточно-агрегатный способ* производства предполагает (рис. 11.45) формование изделий на установках – агрегатах, включающих формовочную машину (например, виброплощадку), бетоноукладчик и машину для укладки формы на формовочный пост (формуук-

ладчик). Отформованные изделия перемещают в камеры твердения, затем распалубливают и направляют на склад, а освободившиеся формы подготавливают к следующему циклу.

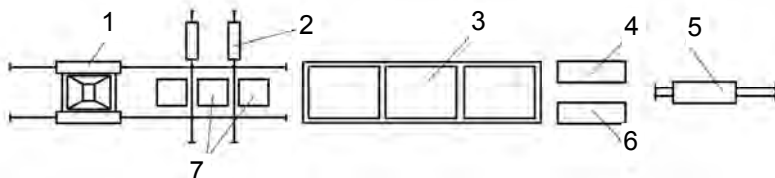


**Рис. 11.45.** Схема агрегатно-поточного производства:

1 – бетоноукладчик; 2 – тележка самоходная-формоукладчик;  
3 – камера твердения; 4 – пост распалубки; 5 – тележка самоходная; 6 – подготовка форм; 7 – виброплощадка секционная

Этот способ получил широкое распространение, поскольку отличается гибкостью и возможностью быстрой переналадки при переходе от выпуска одного типа изделий к выпуску другого, а также требует сравнительно небольших капитальных затрат.

*Конвейерный способ* производства отличается от поточно-агрегатного делением технологического процесса на отдельные операции с определенным ритмом, т.е. одинаковой продолжительностью выполнения операций. Различают конвейеры шагового (тележечного) и непрерывного действия (пластинчатые, цепные и др.). К современным типам тележечных конвейеров по производству железобетонных изделий относятся вертикальные двухъярусные станы, на верхней ветви которых выполняются все операции по изготовлению изделий, а на нижней производится тепловая обработка; наклонно-замкнутые конвейеры, отличающиеся размещением камер тепловой обработки под полом цеха рядом с формовочной ветвью и др.

Непрерывным конвейером является вибропрокатный стан, имеющий бесконечную стальную ленту, оснащенную устройствами для приготовления, формования и тепловой обработки бетонной смеси. Конвейерный способ позволяет создать мощный механизированный поточный процесс, он особенно эффективен при серийном выпуске однотипных изделий: стеновых панелей, панелей пе-



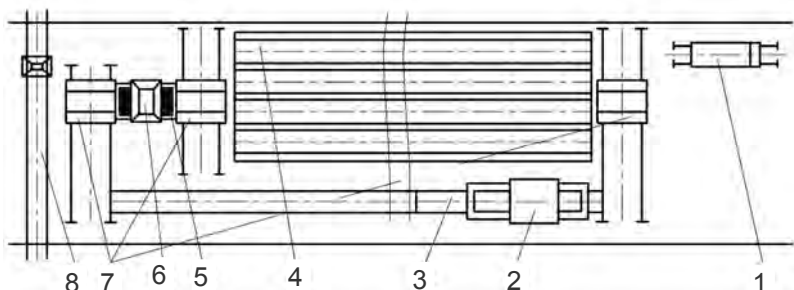


**Рис. 11.46.** Конвейерная линия для производства лотков ор-  
сительных систем с немедленной распалубкой:  
1 – тележка вывоза готовой продукции; 2 – установка чистки и  
смазки поддонов; 3 – пост укладки каркасов; 4 – туннельные  
камеры непрерывного действия; 5 – установка формирования  
лотков; 6 – бетоноукладчик; 7 – транспортно-передающее  
устройство; 8 – бетоновозная эстакада

При *стендовом способе* изделия изготавливают в неподвижных формах на специально оборудованных стендах. Стендовая техно-  
логия особенно целесообразна при изготовлении крупноразмерных  
и предварительно напряженных изделий, ее применяют также и в  
условиях полигонов, когда тепловая обработка осуществляется в  
напольных камерах или термоформах. Продолжительность техно-  
логического цикла составляет обычно 1-2 сут.

Разновидностью стендового является *кассетный способ* произ-  
водства, особенностью которого является формирование изделий в  
вертикальном положении в стационарных разъемных групповых  
формах – кассетах.

Для ускорения твердения изделий в заводских условиях приме-  
няют тепловлажностную обработку – пропаривание при нормаль-  
ном давлении и температуре до 95°C, электропрогрев, контактный  
прогрев в формах, твердение в бассейнах с горячей водой, обогрев  
лучистой энергией и др. Режимные параметры тепловлажностной  
обработки – предварительное выдерживание, температура и ско-  
рость, длительность ее подъема, длительность изотермического

прогрева и охлаждения – зависят от вида и активности цемента, класса и требуемой отпускной прочности бетона, удобоукладываемости бетонной смеси, вида химических добавок, конструктивных параметров изделий и других факторов.

**Фибробетоны.** К *фибробетонам* или дисперсно-армированным бетонам принадлежит группа композиционных материалов, включающих короткие отрезки различных волокон (*фибры*) в цементной матрице. В качестве фибры могут служить различные типы волокон из стали, стекла, базальта, синтетических материалов, асбеста, углерода и др.

Дискретное армирование цементного камня волокнами позволяет существенно повысить его удельную прочность в особенности на растяжение и изгиб, трещиностойкость, стойкость к ударным и вибрационным влияниям, сопротивлению истиранию и др. Применение фибробетона также позволяет:

- реализовать эффективные конструктивные решения, например, тонкостенные конструкции без стержневой или сетчатой распределительной арматуры;

- снизить трудозатраты на арматурные работы и повысить степень механизации и автоматизации производства армированных конструкций; применить новые, более производительные приемы формирования армированных конструкций, например, пневмонабрызг, роликовое формирование и др.

Волокна повышают несущую способность матрицы. В результате различия между значениями модулей упругости армирующих волокон и матрицы осуществляется передача нагрузки в контактной зоне через матрицу к волокну.

Теоретические модели дисперсно-армированных цементных систем предполагают однородное распределение дискретных волокон в матрице. Для композиционных материалов с дискретными волокнами модуль упругости ( $E_K$ ) и прочность на растяжение при изгибе ( $R_K$ ) можно ориентировочно рассчитать по формулам:

$$E_K = K_a E_B V_B + E_M V_M, \quad (11.39)$$

$$R_K = K_a R_B V_B + R_M V_M, \quad (11.40)$$

где  $K_a$  – коэффициент армирования бетона,  $E_B$  и  $E_M$  – модули упругости соответственно волокна и матрицы;  $R_B$  и  $R_M$  – прочность при растяжении волокна и матрицы;  $V_B$  и  $V_M$  – объемное содержание волокон и матрицы.

На значение коэффициента армирования  $K_a$  сказываются такие факторы как длина фибры, ее ориентация, различные дефекты. Для материалов с ориентированными непрерывными волокнами  $K_a=1$  и разрушение происходит в результате разрыва волокон, а не их выдергивания. Коэффициент армирования равен единице также, если фибры ориентированы параллельно направлению приложенного напряжения. Выдергивание или скольжение фибры в контактной зоне произойдет, если фибра будет короче критической длины ( $l_{кр}$ ):

$$l_{кр} = \frac{d_b R_d}{2 R_{сд}^k}, \quad (11.41)$$

где  $d_b$  – диаметр волокна;  $R_d$  – прочность волокна;  $R_{сд}^k$  – прочность контактной зоны на сдвиг.

В большинстве случаев фибры не являются ориентированными параллельно направлению приложенного напряжения и эффект армирования неполный. Если фибры расположены перпендикулярно приложенному напряжению, то они практически не повышают прочность материала. Для фибр полностью неориентированных в трех измерениях величина  $K_a$  примерно равна  $1/6$ , в двух –  $1/3$ .

Минимальное (критическое) объемное содержание волокон, при котором они способны после растрескивания матрицы нести первоначальную нагрузку, составляет около 0,3%, 0,4% и 0,75% соответственно для стальных, стекло- и пропиленовых волокон.

Типичная диаграмма напряжение-деформация фибробетонов включает три зоны (рис. 11.47):

- I – зона упругой работы как матрицы, так и фибры;
- II – зона попеременного перемещения напряжения на матрицу и фибры и образования микротрещин;
- III – зона восприятия нагрузки фибрами.

В III-ей зоне полное разрушение материала сдерживается прочностью сцепления в контактной зоне или прочностью лишь одних фибр.

При разрушении фибробетона максимальная работа, совершаемая при разрыве, выражается зависимостью:

$$W_p = V_b R_b l_{кр} / 12 \quad (11.42)$$

При  $l \leq l_{кр}$  работа разрыва определяется энергией, необходимой для выдергивания фибр. При  $l > l_{кр}$  материал разрушается при разрыве фибр и работа разрыва обратно пропорциональна длине фибр-

ры. Работа разрыва пропорциональна также диаметру фибры и увеличение прочности на разрыв фибробетонов может быть достигнуто применением жгутов волокон и таким образом увеличения их рабочего диаметра.

Наиболее распространены фибробетоны на портландцементе, армированные стальным волокном – *сталефибробетоны*. Стальное волокно обычно представлено отрезками проволоки, в том числе из отработанных канатов. Фибры могут иметь различное поперечное сечение – круглое, овальное и др. размерами от 0,2 до 1,6 мм и длину от 10 до 160 мм. Поверхность фибр может быть профилированной, обработанной травлением и, как исключение, гладкой. Количество вводимых в бетон фибр в большинстве случаев колеблется от 0,5 до 2% по объему. Введение в бетон стальных фибр в количестве 1-1,5% по объему увеличивает его прочность на растяжение до 100%, прочность на изгиб на 150-200%, прочность на сжатие повышается на 10-25%.



**Рис. 11.47.** Типичная кривая зависимости напряжение-деформация для цементных композиций, армированных волокном

За счет более высокой трещиностойкости сталефибробетон обладает повышенной в 1,5-2 раза морозо-, жаро- и огнестойкостью, водонепроницаемостью. Ценными качествами сталефибробетона являются повышенная износостойкость, ударная и динамическая стойкость. Так, износостойкость сталефибробетона увеличивается на 30-50%, а сопротивление удару в 10-12 раз.

Использование сталефибробетона перспективно как в сборных, так и в монолитных конструкциях: дорожных и аэродромных покрытиях, торкретных слоях для облицовки шахт тоннелей и огнезащитных футеровок, тонкостенных и ребристых плитах покрытий, элементах оболочек, свай, шпал и др.

Эффективность применения сталефибробетонных конструкций может быть достигнута за счет уменьшения трудозатрат на арматурные работы, сокращения расхода стали и бетона за счет уменьшения толщины конструкций, совмещения технологических операций приготовления бетонной смеси и армирования, увеличения долговечности конструкций и снижения затрат на текущий ремонт.

При значительных пролетах и нагрузках в конструкциях целесообразно объединение фибрового и стержневого армирования, т.е. применение комбинированного армирования.

Введение стальных волокон в бетонную смесь представляет определенные технологические трудности, что связано с комкованием, образованием “ежей”, сложностью надлежащего уплотнения материала. Фибру вводят в предварительно перемешанную смесь цемента, воды и заполнителя или смешивают сначала заполнители и волокна, а затем добавляют цемент и воду. Для приготовления фибробетона используют также смесители с пульсирующим воздействием на смесь и другие специальные смесители.

Наряду со сталефибробетоном в строительстве имеется положительный опыт применения *стеклофибробетона*, позволяющего дополнительно существенно снизить массу конструкций. Его получение основано на включении в цементное тесто или цементно-песчаный раствор щелочестойкого волокна в количестве до 5% по массе. Прочность на растяжение и изгиб армированного стеклом раствора превышает прочность неармированного раствора в 2-3 раза даже после 10 лет воздушного хранения. Максимальная деформация от предельного растягивающего усилия у стеклоармированного раствора в 10 раз больше, чем для неармированного раствора.

Из полимерных волокон, применяемых для армирования бетона наиболее распространены полипропиленовые, отличительная их особенность – хорошая совместимость с портландцементом и высокая стойкость в среде твердеющих вяжущих. Полипропиленовые, как и другие полимерные волокна изготавливают диаметром 10-500 мкм.

Полипропиленовые волокна также как и стальные значительно повышают раннюю прочность композитов на растяжение. При добавке уже 0,1% волокна усадка снижается до 50%, существенно увеличивается прочность бетона на изгиб и сопротивление удару.

Бетоны с полипропиленовыми волокнами имеют высокую морозостойкость, бактерицидность, огнестойкость. Их применяют в конструкциях морских сооружений, мостов, водохранилищ, торкретных облицовках. По сравнению со стальной фиброй полипропиленовая проще дозируется, облегчает укладку бетонной смеси.

**Асбестоцемент.** Асбестоцемент – композиционный материал, представляющий собой цементный камень, армированный волокнами асбеста. Асбест представляет собой горную породу, состоящую из кристаллических минералов нитевидной формы, способных расщепляться на тонкие волокна. Волокна асбеста эластичны, теплостойки, проявляют значительную адсорбционную активность, высокую механическую прочность, хорошо смачиваются водой.

Существуют две разновидности асбеста – хризотилковый (серпентиновый) и амфиболовый.

*Хризотил-асбест* – это волокнистый минерал серпентиновой группы, имеющий преимущественное промышленное применение. Наиболее крупные мировые запасы асбеста сосредоточены в России, Африке и Канаде. Химический состав хризотил-асбеста  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$  соответствует составу водных силикатов магния.

Большая удельная поверхность асбестовых волокон ( $15\text{--}30\text{ м}^2/\text{г}$ ) определяет их высокую адсорбционную активность, в том числе по отношению к продуктам гидратации цемента.

При действии высоких температур асбест не горит, но подвержен необратимым процессам разложения: адсорбционная и структурная вода полностью удаляются из него при  $600\text{--}770^\circ\text{C}$ , при  $800\text{--}820^\circ\text{C}$  наблюдается переход асбеста в форстерит, при температуре  $1550^\circ\text{C}$  асбест плавится.

Распушенный асбест, в зависимости от насыпной массы, имеет низкую теплопроводность –  $0,055\text{--}0,077\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ .

Прочность волокон асбеста определяет прочность асбестоцементных изделий. Недеформированный асбест ведет себя при растяжении как упругий материал, подчиняющийся закону Гука. Модуль упругости асбеста составляет  $150\text{--}185\cdot 10^3\text{ МПа}$ , а прочность при растяжении образцов длиной  $2\text{--}10\text{ мм}$  –  $3200\text{--}5400\text{ МПа}$ . Прочность материала при технологической обработке снижается, но остается на довольно высоком уровне – до  $700\text{ МПа}$ .

Применение *амфиболового асбеста* для производства строительных изделий ограничивается вследствие его канцерогенности.

Последние исследования применительно к хризотил-асбесту показали его экологическую безопасность.

Товарный асбест получают при обогащении асбестовой руды. В зависимости от длины волокна, степени его распушивания и содержания примесей асбест разделяется на сорта и марки.

Свойства асбестоцемента формируются в результате активного влияния асбестоцементных волокон на свойства цементного камня, что приводит к существенному увеличению предела прочности при растяжении и изгибе, предельной растяжимости. Основные недостатки асбестоцементных изделий – сравнительно невысокая ударная прочность и склонность к короблению.

Ударная вязкость асбестоцемента снижается с увеличением возраста и увеличивается с повышением влажности. Коробление асбестоцементных листов может наблюдаться при одностороннем увлажнении. Значительное снижение величины коробления дает прессование листов. Оно достигается также при применении песчаных цементов, автоклавной обработки, использовании длинноволокнистого асбеста и особенно при гидрофобизации изделий.

Теплопроводность асбестоцемента зависит от его плотности и содержания асбеста. Например, при максимальной плотности материала  $1,9 \text{ г/см}^3$  и естественной влажности она составляет  $0,348 \text{ Вт/м}^0\text{С}$ .

Теплостойкость асбестоцемента достигает  $500^\circ\text{С}$ . Нагрев в интервале  $600...800^\circ\text{С}$  приводит к дегидратации асбеста и компонентов цементного камня. После охлаждения материал сохраняет не более 15-25% первоначальной прочности. Теплостойкость асбестоцемента может быть существенно повышена при использовании вяжущих с кремнеземистыми добавками.

Продукцией асбестоцементной промышленности являются волнистые листы (рис. 11.48), плоские непрессованные и прессованные листы, трубы, электроизоляционные доски, специальные изделия – вентиляционные короба, листы для градирен, детали для гидроизоляционных сводов метрополитена и др.

При возведении ограждающих конструкций зданий производственного назначения применяют асбестоцементные панели типа "сэндвич" с минераловатным или пенопластовым утеплителем. Изготавливают также экструзионные погонажные асбестоцементные изделия, многопустотные плиты и панели (рис. 11.49). Для водопроводных и мелиоративных систем широко применяют напорные,

а для наружных канализационных трубопроводов, прокладки кабелей телефонной связи и др. - безнапорные асбестоцементные трубы.

Волнистые асбестоцементные листы изготавливают по ГОСТ 30340-95 двух видов, определяемых высотой и шагом волны: 40/150 и 54/200 (в числителе указана высота, в знаменателе – шаг волны в миллиметрах). Физико-механические показатели листов и деталей должны соответствовать указанным в табл. 11.25.

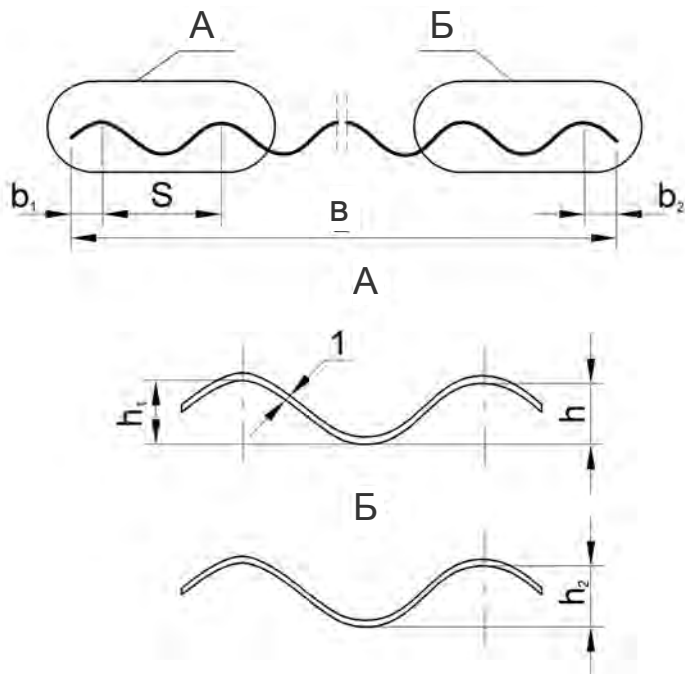


**Рис. 11.48.** Форма поперечного сечения волнистого листа:  
 В – ширина листа  $b_1$  – ширина перекрывающей кромки;  $b_2$  –  
 ширина перекрываемой кромки;  $s$  – шаг волны; высота волны:  
 рядовой  $h$ ; перекрывающей  $h_1$ ; перекрываемой  $h_2$

Волнистые листы изготавливают с номинальной длиной 1750 мм, шириной 1125 для 6-волнового, 980 – 7 – волнового и 1130 мм для 8 – волнового листа. Толщина листов 40/150 – 5,8; 54/200 – 6 и 7,5 мм.

Плоские асбестоцементные листы изготавливают двух типов: прессованные и непрессованные. Нормируемые минимальные физико-механические показатели (ГОСТ 18124-95) плоских листов:



|                                      | прессованные | непрессованные |
|--------------------------------------|--------------|----------------|
| Предел прочности при изгибе, МПа     | 23           | 18             |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>         | 1800         | 1600           |
| Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup> | 2,5          | 2,0            |
| Морозостойкость, циклы               | 50           | 25             |

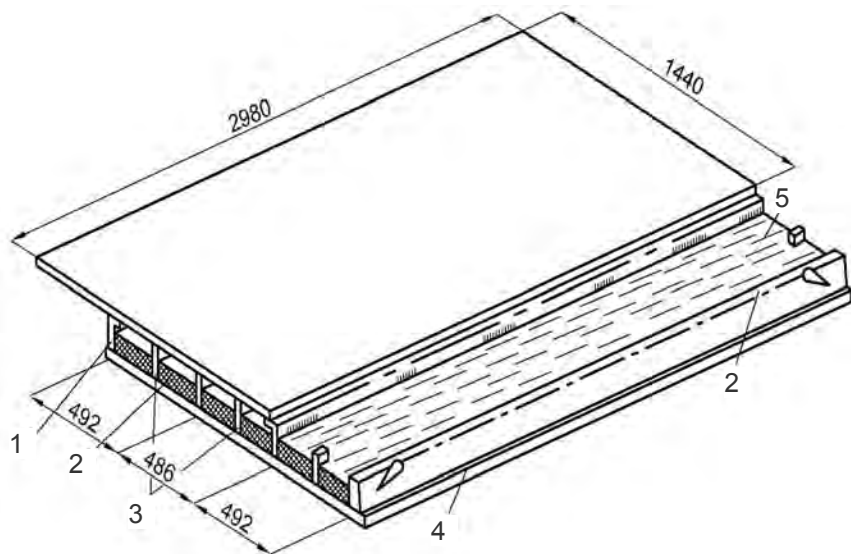


**Рис. 11.49.** Асбестоцементная каркасная плита для покрытий:

1, 3 – деревянные бобышки; 2 – каркас из асбестоцементных швеллеров; 4 – асбестоцементные листы; 5 – утеплитель

Номинальные размеры плоских листов: длина 2500, 3000, 3600; ширина 1200, 1500; толщина 6 и 10,8 мм.

Для производства асбестоцементных изделий применяется особый вид портландцемента, свойства которого способствуют процессу фильтрации твердой фазы из асбестоцементной суспензии и ускоренному твердению изделий. Тонкость помола этого цемента характеризуется удельной поверхностью 2200-3200 см<sup>2</sup>/г. Содержание свободной СаО в исходном клинкере не должно превышать

# 11. Композиционные материалы на основе вяжущих веществ

1%,  $C_3A$  – 8%,  $C_3S$  должно быть не менее 52%. Начало схватывания в отличие от обыкновенного портландцемента должно наступать не ранее чем через 1,5 ч от начала затворения. Цемент для производства асбестоцементных изделий, как правило, не содержит минеральных добавок и выпускается обычно двух марок – М400 и М500. При этом на изгиб он испытывается дополнительно в 7-суточном возрасте и должен выдерживать нагрузки соответственно не менее 4,3 и 4,7 МПа.

Таблица 11.25

Физико-механические показатели волнистых  
асбестоцементных листов

| Наименование<br>показателя                                                                                                   | Значение           |                     |      | для де-<br>талей |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|------|------------------|
|                                                                                                                              | для листов профиля |                     |      |                  |
|                                                                                                                              | 40/150             | 54/200 толщиной, мм |      |                  |
|                                                                                                                              |                    | 6,0                 | 7,5  |                  |
| Сосредоточенная<br>штамповая нагрузка<br>кН, не менее                                                                        | 1,5                |                     | 2,2  | -                |
| Предел прочности при<br>изгибе, МПа,<br>не менее                                                                             | 16,0               | 16,5                | 19,0 | 16,0             |
| Плотность, г/см <sup>3</sup> ,<br>не менее                                                                                   | 1,60               | 1,65                | 1,70 | 1,60             |
| Ударная вязкость,<br>кДж/м <sup>2</sup> , не менее                                                                           | 1,5                |                     | 1,6  | 1,5              |
| Водонепроницаемость,<br>ч, не менее                                                                                          | 24                 |                     |      | -                |
| Морозостойкость:<br>- число циклов попе-<br>ременного заморажи-<br>вания и оттаивания без<br>видимых признаков<br>разрушения | 25                 |                     | 50   | 25               |
| - остаточная проч-<br>ность, %, не менее                                                                                     | 90                 |                     |      |                  |

Технологический процесс получения асбестоцементных изделий включает обминание и распушивание асбеста, тщательное смешивание полученных тончайших волокон с цементом в водной среде и образование суспензии, формование изделий на листо- или трубо-

формовочных машинах с последующей их тепловой обработкой. Формование заключается в образовании из суспензии на сетчатом цилиндре тонкого слоя асбестоцемента, его обезвоживании и уплотнении. Полученные заготовки волнистых листов подвергают профилированию, а труб – токарной обработке. Состав асбестоцементной массы колеблется в пределах: асбеста 13-17%, портландцемента 83-87% (при производстве труб содержание асбеста несколько выше, чем для листовых материалов). В некоторых случаях в портландцемент добавляют 30-40% тонкомолотого кварцевого песка.

При использовании для наружной облицовки стен, перегородок и панелей применяют листы, окрашенные как в массу, так и с поверхности, офактуренные рельефным рисунком. Наибольшее распространение получил способ окрашивания асбестоцементных листов перхлорвиниловыми эмалями. Эффективны декоративные покрытия на основе силикатных красок. Возможна также отделка асбестоцементных листов древесным шпоном.

При производстве экструзионных панелей изделия непрерывно формируются с помощью экструзионного пресса выдавливанием через мундшук, обрезаются до требуемых размеров и поступают на твердение. Производство асбестоцементных панелей способом экструзии по сравнению с традиционной технологией изготовления конструкций из плоских листов позволяет использовать асбест низких сортов, резко сократить расход воды, а также полностью исключить наиболее трудоемкий передел сборки. Использование асбестоцементных панелей покрытий по сравнению с железобетонными обеспечивает уменьшение массы конструкции в 6 раз, сокращение трудоемкости монтажных работ на 40%.

В строительстве широко применяют асбестоцементные трубы (рис. 11.50). В зависимости от назначения асбестоцементные трубы подразделяют на напорные для устройства закрытых напорных и наружных водоводов и безнапорные для устройства внутренней и наружной канализации и водосточков.

При строительстве напорных водоводов применяют асбестоцементные трубы классов ВТ-6, ВТ-9, ВТ-12 и ВТ-15 с диаметром условного прохода 100-500 мм. Цифра в обозначении класса указывает максимальное рабочее давление, при котором может быть использована труба.

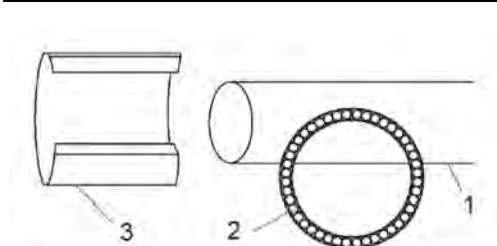


**Рис.11.50.** Асбестоцементные трубы и соединительные детали: 1 – труба; 2 – прокладка; 3 – муфта

Для соединения труб применяются асбестоцементные муфты типа САМ с уплотнительными резиновыми кольцами. Асбестоцементные муфты обеспечивают герметичность соединений вплоть до разрыва труб. Трубы и муфты должны быть прямыми, цилиндрической формы без

трещин и расслоений. Искривление наружной необточенной поверхности труб (отклонение от прямолинейности) не должно превышать 12 мм. При гидравлическом испытании труб и муфт на их наружной поверхности не должно быть никаких признаков проникновения воды. Испытательное гидравлическое давление должно быть (ГОСТ 539-80): для труб первой категории класса ВТ-6 и муфт типа САМ-6 – 1,2 МПа; ВТ-9 и САМ-9 – 1,8; ВТ-12 и САМ-12 – 2,4; ВТ-15 и САМ-15 – 3 МПа; для труб второй категории класса ВТ-6 и муфт типа САМ-6 – 1,5 МПа; ВТ-9 и САМ-9 – 2,0; ВТ-12 и САМ-12 – 2,5; ВТ-15 и САМ-15 – 3,2 МПа.

Безнапорные асбестоцементные трубы выпускаются диаметром условного прохода от 100 до 400 мм, имеют меньшую толщину стенок и должны при гидравлическом испытании выдерживать давление не менее 0,4 МПа.

Асбестоцементные трубы обладают высокой стойкостью к коррозии и не разрушаются под воздействием блуждающих токов. Низкая капиллярная пористость обеспечивает их водонепроницаемость и морозостойкость. Они значительно дешевле и долговечнее стальных и чугунных труб. Срок их службы в напорных водоводах превышает 30 лет.

#### 11.4. Материалы на основе нецементных вяжущих

Наряду с портландцементом для получения безобжиговых каменных материалов широко применяют известесодержащие и

гипсовые вяжущие. На основе известково-кремнеземистых вяжущих получают силикатные материалы автоклавного твердения, основными представителями которых являются силикатный кирпич и камни, а также плотные и ячеистые силикатные бетоны. Гипсовые вяжущие широко применяют для получения гипсовых растворов и бетонов, гипсокартонных и гипсоволокнистых листовых материалов.

**Силикатные материалы автоклавного твердения.** Распространение силикатных материалов началось с 1880 г., когда В. Михаэлисом был предложен силикатный кирпич. Основопологающей идеей получения силикатных материалов является твердение известково-кремнеземистых композиций в результате синтеза гидросиликатов при повышенных значениях температуры и давления водяного пара.

Основными исходными компонентами силикатных материалов являются воздушная известь и кварцевый песок. Качественные показатели сырьевых материалов должны обеспечивать их высокую реакционную способность. Существенное влияние на скорость реакций и кинетику формирования структуры искусственных каменных материалов оказывают химический и минералогический состав известково-кремнеземистой смеси, а также ее дисперсность.

Реакционная способность извести зависит в основном от содержания активного оксида кальция, размеров кристаллов  $\text{CaO}$ , содержания  $\text{MgO}$ . С повышением температуры обжига известняков увеличивается размер кристаллов  $\text{CaO}$  и замедляется скорость гашения.

Для изготовления автоклавных силикатных материалов применяют кварцевые пески, содержащие не менее 75-80%  $\text{SiO}_2$ . Большинство примесей в песке являются инертными включениями и не участвуют в образовании гидросиликатной связки. Нежелательны примеси в песке карбонатов и слюды.

Технология широко распространенных стеновых материалов – *силикатного кирпича и камней* включает приготовление известково-кремнеземистого вяжущего, смешивание его с мелким заполнителем – кварцевым песком и получение силикатной массы, которая увлажняется и поступает на гашение.

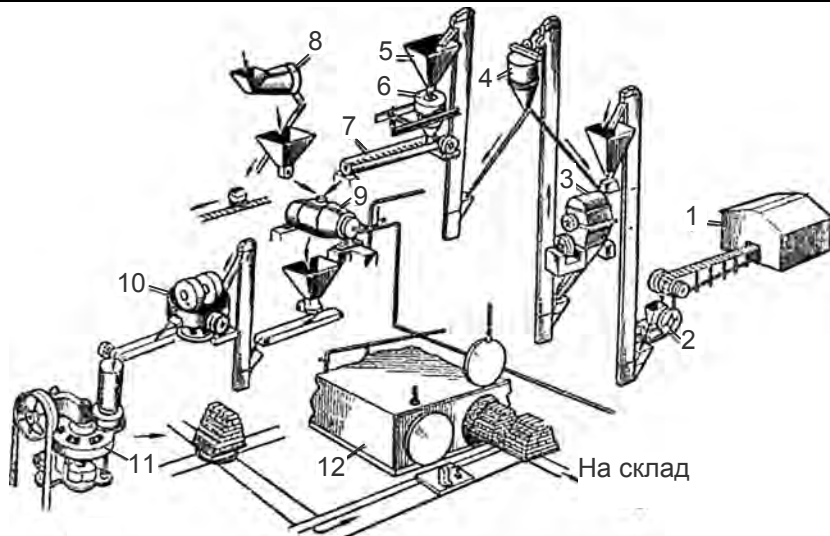


**Рис. 11.51.** Схема производства силикатного кирпича по барабанному способу: 1 – склад извести; 2 – дробилка; 3 – мельницы; 4 – сепаратор; 5 – бункер молотой извести; 6 – весы; 7 – шнек; 8 – барабанный грохот для сортировки песка; 9 – барабан для гашения; 10 – бегуны; 11 – пресс; 12 – автоклавы

Разработано два способа приготовления силикатной массы, пригодной для формования изделий: барабанный и силосный. При барабанном способе (рис. 11.51) песок и тонкомолотая негашеная известь поступают во вращающийся гасильный барабан, где известь гасится под давлением 0,15-0,2 МПа. При силосном способе предварительно перемешанную и увлажненную массу направляют для гашения в силосы. Длительность гашения извести во вращающемся барабане 35-40 мин, в силосах 7-12 ч. Вместе с тем силосный способ является более простым и экономичным. Содержание извести в силикатной массе составляет 7-10% в пересчете на активный СаО.

Прессование кирпича и камней производят на прессах при давлении 15-20 МПа. Отформованные изделия укладываются на вагонетки и направляются в автоклав, где их твердение происходит под влиянием насыщенного пара при давлении 0,9-1,6 МПа, при температуре 174-200°C.

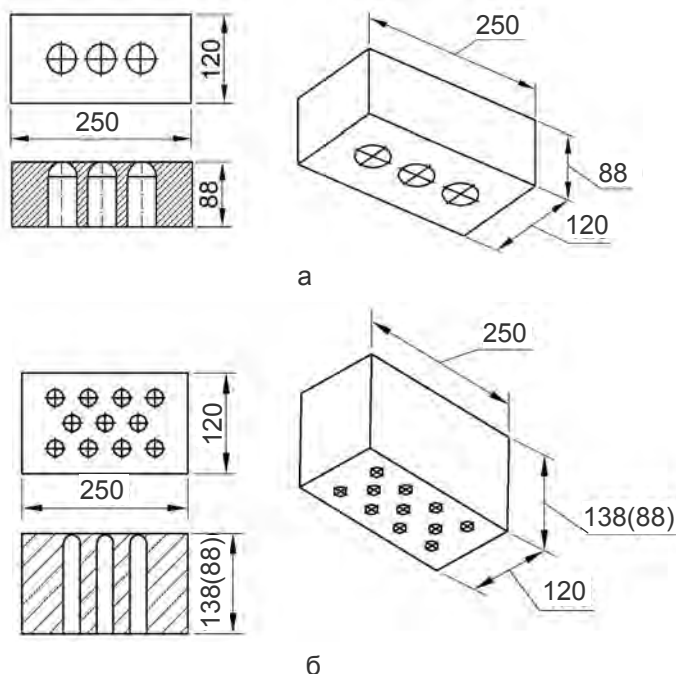


**Рис. 11.52.** Пустотелые силикатный кирпич и камни:  
 а – кирпич 3-пустотный; б – камень(кирпич) 11-пустотный

Тонкомолотое известково-песчаное вяжущее, имеющее, как правило, высокую активность (25-35% активных  $\text{CaO}+\text{MgO}$ ) может быть заменено известково-шлаковым или известково-зольным вяжущим значительно меньшей активности по содержанию активных оксидов кальция и магния (10-15%), что способствует существенному сокращению количества извести в смеси. Аналогичный эффект может быть получен при замене части извести некоторыми другими активными материалами – белитовым шламом, цементной пылью и др.

Экспериментально показано, что повышать давление пара, а следовательно, и температуру в автоклавах целесообразно лишь до определенной величины (обычно, не более 1,7 МПа). Для каждого состава шихты имеется своя оптимальная величина давления и соответственно время выдержки в автоклаве, обеспечивающие полноту

реакции образования гидросиликатов кальция и их кристаллизацию. Дальнейшее повышение давления может вызвать чрезмерный рост кристаллов, что влечет за собой возникновение неблагоприятной структуры цементирующего вещества.

Современная технология силикатного кирпича и камней характеризуется высоким уровнем механизации и автоматизации, требует примерно в 2 раза меньше топлива и в 3 – электроэнергии, чем производство керамического кирпича.

Также как и керамический силикатный кирпич изготавливают одинарным (250х120х65 мм) и утолщенным (250х120х88 мм) полнотелым и пустотелым. Камни (250х120х138 мм) изготавливают пустотелыми (рис. 11.52).

По прочности (ГОСТ 379-95) изделия выпускают марок 75, 100, 125, 150, 175, 200, 250, 300; по морозостойкости F15, F25, F35 и F50. В зависимости от средней плотности полнотелые изделия подразделяют на пористые со средней плотностью до 1500 кг/м<sup>3</sup> и плотные – свыше 1500 кг/м<sup>3</sup>.

Силикатные кирпич и камни изготавливают рядовыми и лицевыми. Лицевые изделия отличаются от рядовых улучшенным внешним видом, более точными геометрическими размерами, четкостью граней, повышенной морозостойкостью. По фактуре лицевой поверхности изделия изготавливают гладкими и с декоративным покрытием, по цвету – неокрашенными и окрашенными.

Силикатные также как и керамические кирпич и камни применяют для кладки каменных и армокаменных наружных и внутренних стен зданий и сооружений, а также для их облицовки. Вследствие недостаточной водостойкости их не применяют для фундаментов и цоколей зданий ниже гидроизоляционного слоя, а также для зданий с мокрым режимом эксплуатации без специальных мер для защиты от увлажнения и в условиях воздействия высоких температур (кладка печей, труб и т.п.).

*Силикатные бетоны* – искусственные каменные материалы, получаемые в результате автоклавного твердения бетонных смесей на основе известково-кремнеземистых вяжущих. Для силикатных бетонов приемлема та же классификация, что и для обычных – по структурным признакам и назначению.

Возможно применение двух основных схем производства силикатного бетона – “гидратной” и “кипелочной”, отличающихся



условиями гидратации извести. При *гидратной* схеме известь гасится после смешивания с песком в гасильном барабане или в силосах. При “*кипелочной*” схеме реализуется гидратационное твердение известково-песчаной смеси. Эта схема предусматривает совместное тонкое измельчение негашеной извести с частью кварцевого песка и последующее смешивание этого тонкодисперсного автоклавного вяжущего с остальным песком как заполнителем и водой для получения пластичной удобоукладываемой известково-песчаной смеси. Гидроксид кальция, образующийся при гашении в условиях “кипелочной” схемы, характеризуется более высокой дисперсностью. Прочность, плотность и долговечность силикатного бетона в условиях “кипелочной” схемы выше, чем при применении предварительно загашенной извести (“гидратная” схема).

Регулирование процесса гидратации извести достигается за счет введения растворов некоторых электролитов, ускоряющих скорость гашения, а также за счет добавок ПАВ, замедляющих реакцию гидратации  $\text{CaO}$ .

Лучшими макроструктурой и физико-механическими свойствами обладают бетоны, изготовленные из песков с минимальным объемом межзерновых пустот. Для молотого песка оптимальные размеры фракций 10-50 мкм.

Бетоны наиболее высокой прочности образуются при преобладании в продуктах твердения известково-кремнеземистых смесей гидросиликатов группы  $\text{CSH}(\text{B})$ . Однако имеются данные, что бетоны, цементирующими соединениями в которых служат гидросиликаты  $\text{CSH}(\text{B})$ , а также  $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$ , имеют пониженную морозостойкость и повышенные усадочные деформации.

Рост прочности бетонов при автоклавной обработке проходит через максимум и при длительном запаривании начинает снижаться. Увеличение прочности обусловлено интенсивным образованием высокодисперсных гидросиликатных клеящих прослоек на зернах песка. По мере затухания этого процесса идет перекристаллизация — укрупнение частичек гидросиликатов, что приводит к уменьшению площади контактов и снижению механических показателей твердеющего материала. По мере образования кристаллического сростка из новых гидросиликатов прочность вновь начинает расти.

С оптимальными значениями давления и температуры автоклавной обработки связано и оптимальное значение дисперсности известково-кремнеземистого вяжущего, определяющей степень пересыщения раствора, необходимую для получения прочного кристаллического сростка. Прочность силикатных бетонов изменяется в широких пределах: от 5-10 МПа для легких и до 80-100 МПа для высокопрочных тяжелых бетонов. Наибольшее распространение получили мелкозернистые силикатные бетоны, заполнителем которых является обычный кварцевый песок.

При использовании негашеной извести ориентировочно прочность плотного силикатного бетона можно определить по формуле:

$$R_6 = 4,05 \left( \frac{S_{м.п.}}{100} + \frac{1,6}{Ц/B-1} \right), \quad (11.43)$$

где  $S_{м.п.}$  – удельная поверхность молотого песка,  $м^2/кг$ .

При использовании гашеной извести:

$$R_6 = 16 \left( \frac{Ц_{и}}{B} - 1 \right) + 14, \quad (11.44)$$

где  $Ц_{и}$  – расход известково-песчаного вяжущего,  $кг/м^3$ .

Прочность мелкозернистого силикатного бетона изменяется в зависимости от расхода известково-кремнеземистого вяжущего и крупности заполнителя (рис. 11.53).

Содержание активного оксида кальция в силикатобетонной смеси изменяется в зависимости от требуемой прочности бетона с учетом вида и крупности песка (табл. 11.26, рис. 11.54, 11.55).

В результате участия песка в реакции образования гидросиликатов кальция расход извести в силикатном бетоне примерно на 30% меньше, чем расход цемента для обычных цементных бетонов той же прочности.

На прочность силикатного бетона, как и обычного, существенно влияют не только качественные показатели вяжущего и вяжущее-водное отношение, но и однородность смеси, степень ее уплотнения, водосодержание и др.

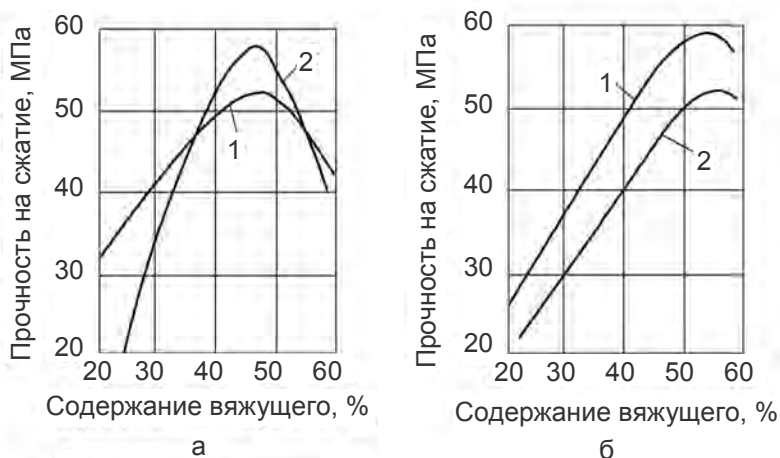


**Рис. 11.53.** Зависимость прочности мелкозернистого бетона от содержания вяжущего: а – песок: 1 – крупный; 2 – мелкий; б – известь: 1 – негашеная; 2 – гидратная

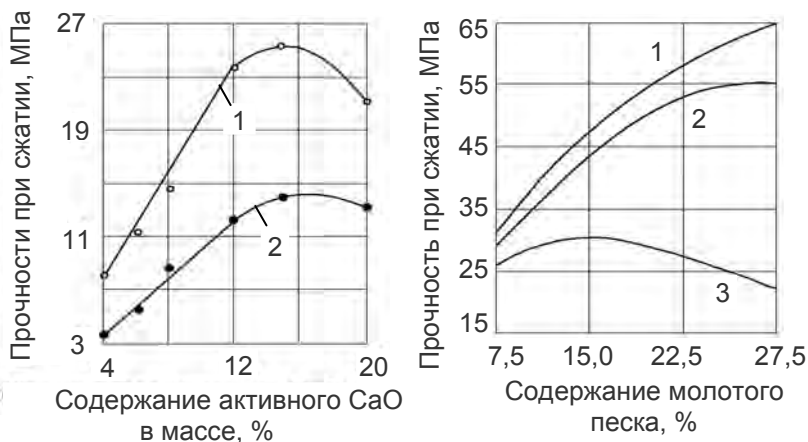


**Рис. 11.54.** Влияние активного СаО в смеси на предел прочности при сжатии известково-песчаных образцов: 1 – на основе кварцевого песка; 2 – на основе полевошпатового песка

**Рис. 11.55.** Зависимость прочности силикатного бетона от содержания и тонкости помола песка с удельной поверхностью: 1 – 4500 см²/г; 2 – 2500 см²/г; 3 – 1500 см²/г. Содержание активного СаО в смеси 12,5%

Содержание активного СаО, % от массы уплотненной  
силикатобетонной смеси

| Класс<br>бетона | Песок           |        |         |         |
|-----------------|-----------------|--------|---------|---------|
|                 | очень<br>мелкий | мелкий | средний | крупный |
| B15             | 6,5             | 6,2    | 6       | 5,8     |
| B25             | 7,5             | 7,2    | 7       | 6,5     |
| B30             | 9               | 8,5    | 8       | 7,5     |
| B40             | 10,5            | 9,5    | 8,5     | 8       |

Повышение прочности достигается введением добавок-электролитов, ускоряющих процесс образования гидросиликатов кальция ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) в количестве 0,5-1%, а также тонкодисперсных активных добавок (трепел, опока, туфы, шлаки и др.).

*Модуль упругости* силикатного бетона при той же крупности заполнителя имеет существенно (25-30%) меньшее значение по сравнению с модулем упругости равнопрочного цементного бетона нормального твердения. При пониженных значениях модуля упругости силикатный бетон может иметь существенно меньшую ползучесть, чем цементный.

Для автоклавного силикатного бетона характерно несколько пониженное сцепление с арматурой. Если для обычного жесткого бетона на портландцементе отношение прочности сцепления к прочности на сжатие составляет 0,23-0,28, то для силикатного бетона оно равно 0,10-0,22. При применении арматуры периодического профиля сцепление силикатного бетона с арматурой возрастает в 1,5-2,5 раза. В силикатных бетонах более вероятна, чем в цементных, коррозия арматуры, что объясняется меньшей щелочностью среды. Если в цементных бетонах  $\text{pH}=12-13,5$ , то в силикатных – 9,5-11. Наиболее благоприятные условия для развития коррозии арматуры создаются при недостаточной плотности бетона и эксплуатации его в условиях повышенной влажности (до 75-85%).

*Водостойкость* силикатных материалов автоклавного твердения изменяется в значительных пределах. Прочность силикатного кирпича в воде может снижаться до 30%, что объясняется его повышенной открытой пористостью, возможным содержанием неко-

торого количества свободной гидратной извести. Коэффициент размягчения силикатных бетонов в воде колеблется обычно в интервале 0,8-0,9. Наиболее водостойкими являются плотные силикатные бетоны, цементирующая связка которых состоит из гидросиликатов CSH(B), тоберморита, ксонотлита. Это достигается правильным выбором соотношения CaO и SiO<sub>2</sub>, надлежащей тонкостью помола вяжущего, введением добавок доменного шлака и др. Многие исследователи экспериментально доказали, что водостойкость силикатных бетонов может быть не ниже, чем бетона на портландцементе.

*Морозостойкость* силикатных бетонов, так же как и цементных, определяется в основном структурой порового пространства.

Силикатный бетон, уплотненный вибрированием, имеет обычно морозостойкость 50-100 циклов. При низкой формовочной влажности можно повысить морозостойкость до 150-300 циклов.

Морозостойкость силикатных бетонов с использованием негашеной извести, как правило, выше, чем бетонов, изготовленных по гидратной схеме производства. Последние отличаются повышенной водопотребностью и более низкой плотностью. Так же как и для цементных бетонов, морозостойкость силикатных бетонов можно существенно повысить, вводя воздухововлекающие добавки.

Разновидностью силикатного бетона является *силикальцит*. Технология этого материала предложена И.К. Хинтом и отличается тем, что помол и смешивание извести и песка осуществляют в быстроходном дезинтеграторе (с числом оборотов до 1500 в минуту). Таким способом обеспечивают минимальный слой извести между дисперсными кварцевыми частицами и высокую прочность материала. Различают силикальцит вибрированный, литой и пеносиликальцит. Прочность силикальцита на сжатие может превышать 100 МПа, он характеризуется высокой морозо- и коррозионной стойкостью.

Область применения в строительстве силикатных бетонов достаточно обширна. Это стеновые, облицовочные, конструктивные, теплоизоляционные изделия, изделия специального назначения – шпалы, тубинги, пресованные кровельные изделия и др.

**Шлаковые и зольные бетоны.** Шлаки и золы занимают одно из первых мест среди промышленных отходов. Они образуются при высокотемпературных процессах (1300-1700°С) в результате взаи-

модействия топлива, руды и плавней при получении металлов (металлургические шлаки) или при сжигании твердых видов топлива на тепловых электростанциях (топливные шлаки и золы).

Шлаки и золы приобретают способность твердеть при щелочной, известковой, сульфатной и смешанных видах активизации. В зависимости от их минералогического состава, химического состава и содержания активных фаз, дисперсности, вида и концентрации активизатора шлаковые и зольные материалы с различной интенсивностью твердеют в нормальных условиях и при тепловлажностной обработке. Вяжущие свойства большинства минералов, входящих в шлаки и золы, в наибольшей мере проявляются при тепловлажностной обработке в автоклаве при давлении не менее 0,8 МПа. Большинство из этих минералов в условиях повышенной температуры и давления активно взаимодействуют с гидроксидом кальция с образованием гидросиликатов кальция и магния.

Наиболее высокая активность вяжущих как при нормальном твердении, так и в условиях тепловлажностной обработки в пропарочных камерах и автоклавах обеспечивается при применении доменных шлаков.

В производстве ячеистых бетонов, твердеющих при автоклавной обработке, эффективно применение известково-шлаковых вяжущих, полученных на основе гранулированных доменных шлаков. Отвалы шлаки применяют, если величина их модуля основности составляет не менее 0,6.

Прочность ячеистых бетонов на шлаковых материалах изменяется в зависимости от средней плотности. Так, теплоизоляционный газозолошлакобетон с  $\rho_0=400-500 \text{ кг/м}^3$  имеет прочность на сжатие 0,6-2 МПа, а конструктивно-теплоизоляционный ( $\rho_0=600-1200$ ) – 3-12,5. Максимальная прочность ячеистых бетонов достигается при соотношении между шлаковым вяжущим и кремнеземистым компонентом в пределах 1:0,5-1:1,2 в зависимости от особенностей сырьевых материалов. На прочность также влияет тонкость помола шлаковых материалов.

Шлаковые вяжущие и заполнители широко применяют для производства легких бетонов со средней плотностью 1200-1600  $\text{кг/м}^3$  и прочностью на сжатие 5-25 МПа. Для *легких шлаковых бетонов* характерны общие свойства, присущие легким бетонам, такие как достижение максимальной прочности при расходе воды, обеспе-

чивающем минимальный выход бетонной смеси, а также при использовании фракционированных пористых заполнителей; рост прочности с увеличением расхода вяжущего до определенного предела и др. Особенности легких шлаковых бетонов на бесклнкерных шлаковых вяжущих являются большая деформативность и несколько меньшее сцепление с арматурой, чем у бетонов на портландцементе.

Легкими заполнителями шлаковых бетонов обычно служат: шлаковая пемза с насыпной плотностью  $\rho_0=500\ldots 800 \text{ кг/м}^3$ , гранулированный доменный шлак ( $\rho_0=700\text{--}1000$ ), доменные поризованные отвалыные шлаки ( $\rho_0=800\text{--}1000$ ).

**Шлакощелочные бетоны.** В группу шлакощелочных входят бетоны, объединяющим признаком которых является применение шлакощелочных вяжущих материалов.

Ориентировочный состав тяжелых бетонов, %: молотый гранулированный шлак – 15-30; щелочной компонент – 0,5-1,5; заполнители – 70-85.

Помимо традиционных заполнителей (щебня, гравия, песка) в шлакощелочных бетонах могут быть использованы многие дисперсные природные материалы и попутные продукты различных отраслей промышленности.

Физико-механические свойства шлакощелочных бетонов можно изменять в широких пределах, подбирая исходные материалы, варьируя состав бетонной смеси и применяя различные технологические приемы. Показатели большинства свойств этого вида бетонов приближаются к показателям цементных бетонов, а в ряде случаев они могут быть и существенно выше.

**Гипсовые материалы.** Из гипсовых материалов в строительстве широко применяют гипсокартонные и гипсоволокнистые листы и панели, декоративные и акустические гипсовые изделия, гипсобе-тонные изделия, сухие смеси для отделочных работ.

*Гипсокартонные листы* (ГКЛ) включают гипсовый сердечник, поверхности которого, кроме торцевых ребер, во время изготовления облицовывают картоном (рис. 11.56). Картонные поверхности листов пригодны для наклеивания обоев, декоративных пленок или покраски без дополнительной подготовки.

ГКЛ применяют для облицовки (сухой штукатурки) стен, устройства перегородок, подвесных потолков, огнезащиты конструк-

ций, ограждения коммуникационных шахт, изготовления декоративных и звукопоглощающих изделий. Они подразделяются в зависимости от свойств и области применения на виды: обычные (ГКЛ); с повышенной сопротивляемостью воздействию открытого пламени (ГКЛО); влагостойкие (ГКЛВ); влагостойкие с повышенной сопротивляемостью воздействию открытого пламени (ГКЛВО). Влагостойкий материал производят с добавкой гранул силикона, а огнестойкий – стекловолокна. Изделия первых двух групп применяют в

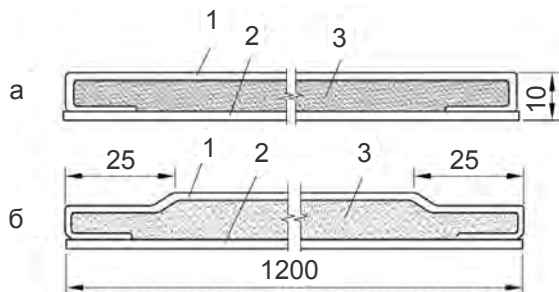


**Рис. 11.56.** Поперечный разрез гипсокартонных листов: а – с гладкими кромками; б – с обжатыми кромками; 1 – картон; 2 – лицевая поверхность; 3 – гипсовый камень

зданиях с сухим и нормальным влажностными режимами, вторых (ГКЛВ и ГКЛВО) – кроме того, в зданиях с влажным и мокрым режимами. В этих случаях их необходимо защищать с лицевой

поверхности водостойкими покрытиями (красками, шпаклевками, плиткой, пленками) и преду-

сматривать в помещениях вытяжную вентиляцию. Водопоглощение листов ГКЛВ и ГКЛВО не должно быть более 10%.

Облицовка конструкций листами ГКЛО и ГКЛВО позволяет повысить их предел огнестойкости. Их целесообразно применять в помещениях с повышенной пожарной опасностью. Сопротивляемость листов ГКЛО и ГКЛВО воздействию открытого пламени должна быть не менее 20 мин.

По внешнему виду и точности изготовления листы подразделяют на группы А и Б. Листы должны иметь прямоугольную форму в плане. Отклонение от прямоугольности не должно быть более 3 мм для листов группы А и 8 мм – группы Б. Размеры листов, мм: длина – 2000-4000 с шагом 50, ширина – 600; 1200; толщина – 6,5; 8; 9,5; 12,5; 14,0; 16,0; 18,0; 20,0; 24,0.

Разрушающая нагрузка (ГОСТ 6266-97) при испытании гипсокартонных листов на изгиб при пролете 350 мм изменяется в зави-



симости от толщины листов для продольных образцов в пределах 125-490 Н, поперечных – 54-136 Н.

Кроме обычных, производят облегченные, поризованные, высокопрочные гипсокартонные листы. Высокопрочные листы имеют повышенную толщину – 16-18 мм, среднюю плотность 750-800 кг/м<sup>3</sup>, прочность не менее 8 МПа. Их армируют штапельным волокном.

На основе гипсокартонных листов изготавливают *облицовочные панели*, оклеенные полимерными пленочными материалами (полипленом, пенопленом и др.).

*Гипсоволокнистые листы*, в отличие от гипсокартонных, армируют не картоном, а равномерно размещенными в толще листов волокнами. Волокнистым сырьем служит преимущественно распушенная бумажная макулатура. Главное преимущество гипсоволокнистых листов по сравнению с гипсокартонными – более высокая прочность. Они имеют лучшую гвоздимость, сохраняют форму при высыхании и увлажнении в жаркую и холодную погоду, имеют высокую звукоизолирующую способность, принадлежат к группе негорючих материалов, хорошо обрабатываются различными инструментами, а также легко обклеиваются обоями, цветным пластиком, фанеруются. Их использование обеспечивает хороший микроклимат в жилых помещениях. Применяют гипсоволокнистые листы в тех же случаях, что и гипсокартонные. Их подразделяют на обычные (ГВЛ) и влагостойкие (ГВЛВ).

Минимальный предел прочности гипсоволокнистых листов при изгибе в зависимости от их толщины (10-20 мм) изменяется от 6 до 4,5 МПа. Кроме гипсоволокнистых листов изготавливают также *гипсоволокнистые плиты*, используемые как доски подоконников, элементы встроенной мебели и перегородки. Находят также применение как отделочные материалы гипсовые литые и прессованные мраморовидные и гипсостружечные плиты.

*Акустические гипсовые литые звукопоглощающие плиты* состоят из гипсового перфорированного экрана, креповой бумаги или ткани, звукопоглотителя и фольги (рис. 11.57). Как звукопоглотители используют теплоизоляционные плиты из стеклянного штапельного волокна, минеральной ваты марок 50-125, а также перлитовый песок.

Для повышения прочности и огнестойкости гипсовый экран армируют рублеными стеклянными волокнами, оцинкованной алюминиевой проволокой и другими нержавеющими материалами.

На ребрах плит имеются с двух взаимно перпендикулярных по-

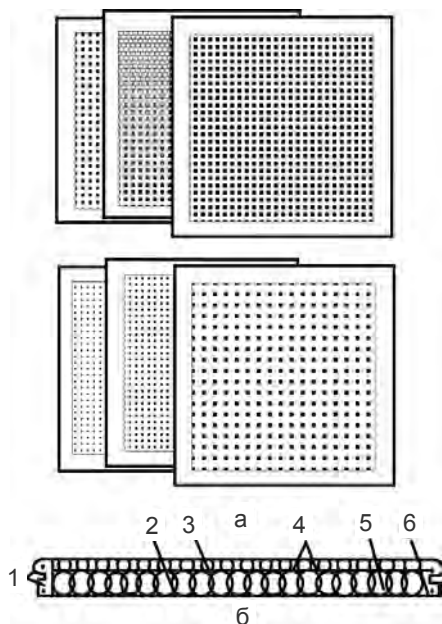


**Рис. 11.57.** Акустические гипсовые литые плиты: а – внешний вид; б – поперечный разрез; 1 – арматура; 2 – минераловатная плита; 3 – хлопковая ткань; 4 – отверстия; 5 – алюминиевая фольга; 6 – гипсовая плита

верхностей уступы, а с других сторон – выступы для опирания. Для крепления к конструкциям в плитах предусмотрены специальные закладные элементы.

К *гипсобетонам* относят бетоны, полученные с применением гипсовых вяжущих и неорганических или органических заполнителей.

Из гипсобетонов изготавливают различными способами стеновые камни, блоки, панели, предназначенные, в основном, для устройства внутренних стен и перегородок. Область применения таких бетонов ограничена, главным образом, из-за их недостаточной водостойкости.

При получении гипсобетонов могут быть использованы практически все разновидности вяжущих на основе сульфата кальция. Наиболее широкое применение находит

строительный гипс, представляющий собой преимущественно  $\beta$ -полуводный сульфат кальция.

Высокая скорость твердения и набора прочности гипсовыми вяжущими позволяет при производстве изделий эффективно использовать конвейерные технологии. Твердение гипсобетона на строительном гипсе в течение 1-2 ч. позволяет обеспечить 35-40% от конечной прочности, которая достигается в естествен-

ных условиях через 5-7 сут. Применение сушки ускоряет набор конечной прочности до 6-10 часов. Благодаря такой скорости твердения готовые изделия могут извлекаться из форм через 20-40 мин.

Серьезными недостатками изделий на основе строительного гипса из него являются наряду с низкой водостойкостью ( $K_p=0,3-0,45$ ), повышенные усадка и повышенная ползучесть (особенно во влажных условиях).

Получение гипсобетонов с более высокой прочностью и водостойкостью возможно при применении высокопрочного гипса, эстрих-гипса, ангидритовых вяжущих. Наиболее перспективны для получения гипсобетонов, способных твердеть как в воздушно-сухих, так и воздушно-влажных условиях, гипсоцементнопуццолановые (ГЦПВ) и гипсошлакоцементнопуццолановые (ГШЦПВ) вяжущие.

Для получения конструкционных гипсобетонных изделий предпочтительнее использовать минеральные заполнители, так как органические не способны создавать достаточно жесткий каркас для восприятия усадочных напряжений при высыхании изделий.

Гипсобетоны на органических заполнителях широко используются при получении изделий для возведения низкоэтажных зданий. В качестве заполнителей используются макулатура, древесная фибра, льняная костра и др. Наибольшее распространение получили гипсобетоны на древесных опилках и стружке.

При условии применения вяжущего одного вида и активности, а также заполнителей определенного качества, *прочность* гипсовых бетонов определяется водогипсовым (или гипсоводным отношением) отношением (рис. 11.58).

Сравнительно низкие значения прочности гипсобетонов во многом обусловлены высокой водопотребностью вяжущих (для строительного гипса – 50-70%, высокопрочного – 30-40%), учитывая, что для гидратации полуводного гипса теоретически необходимо лишь 18,6% воды. В результате твердения образуется структура, имеющая значительную пористость (40-60% и более). Увеличение водогипсового отношения вместе с возрастанием пористости и снижением прочности бетонных изделий требует повышенных расходов тепла на сушку изделий.

Водогипсовое отношение зависит от вида гипсового вяжущего, температуры воды затворения, а также метода формирования изделий.

Для литых гипсобетонных смесей требуемое В/Г составляет 0,55-0,75, соответственно расход вяжущего находится в пределах 800-1000 кг/м<sup>3</sup>. Эффективным для гипсобетонов является использование жестких смесей, уплотненных вибрированием или сочетанием вибрирования с прокатом, прессованием, штампованием. Такие гипсобетонные смеси получают при В/Г=0,4-0,5, при этом расход вяжущего составляет 400-450 кг/м<sup>3</sup>.

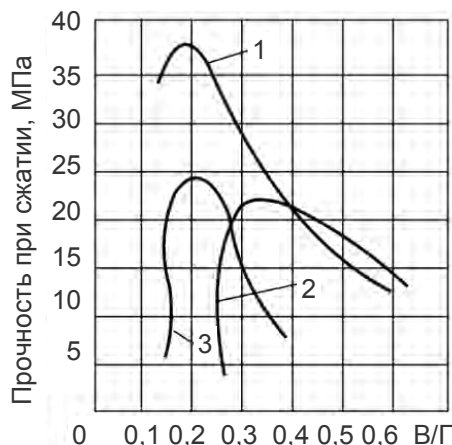


**Рис. 11.58.** Влияние водогипсового отношения на прочность гипса:

- 1 – α-полуводный гипс;  
2, 3 – β-полуводный гипс

При использовании пластифицирующих добавок гидрофилизующего действия – ЛСТ, УПБ и др. водопотребность гипсобетонной смеси снижается на 10-15%, а суперпластификаторов С-3 и др. – на 15-25%.

Интенсивность твердения гипсобетонов зависит, в основном, от скорости твердения вяжущего, она определяется также влажностью окружающей среды и интенсивностью влаготдачи. При нормальных условиях нарастание прочности наиболее интенсивно происходит в начальный период (1-1,5 ч. от момента затворения), в течение которого изделия набирают до 35-40% конечной прочности; за последующие 20-24 ч прочность повышается незначительно, увеличение прочности до 60% происходит после достижения влажности 2-3%. Максимальная прочность гипсобетонов наблюдается при достижении воздушно-сухого состояния, при этом наиболее эффективно применение искусственного высушивания.

На основе строительного гипса получают бетоны с прочностью 5-10 МПа. Использование высокопрочного гипса, ангидритового вяжущего и эстрих-гипса позволяет повысить прочность до 20 МПа. Прочность бетонов при использовании смешанных ГЦП и ГШЦП

вяжущих на основе строительного гипса – 7,5-20 МПа, на основе высокопрочного гипса – 15-40 МПа.

Значительное влияние на прочность гипсобетонов оказывают качество и природа заполнителей. Так, при увеличении крупности песка возможно повышение прочности на 20-30%.

Гипсобетоны на легких заполнителях характеризуются средней плотностью от 1200 до 1700 кг/м<sup>3</sup>, при использовании перлита плотность значительно ниже – 400-650 кг/м<sup>3</sup>. В зависимости от применяемого сырья гипсобетоны на органических заполнителях имеют среднюю плотность от 400-500 (бумажное волокно, костра) до 1100-1300 кг/м<sup>3</sup> (опилки, камыш). Прочность таких материалов 2,5-7,5 МПа при использовании строительного гипса и ангидритового вяжущего и 3,5-10 МПа – на основе ГЦПВ.

*Коэффициент размягчения* гипсобетонных изделий на строительном и высокопрочном гипсе находится в пределах 0,3-0,45 и практически не зависит от вида заполнителя. Увеличение количества заполнителя приводит, в основном, к снижению водостойкости изделий.

Использование ангидритовых вяжущих и эстрих-гипса в гипсобетонных изделиях позволяет увеличить коэффициент размягчения до 0,5. Наибольшее значение коэффициента размягчения (0,65 и выше) достигается при применении ГЦПВ и ГЩЦПВ.

Макропористая структура гипсобетона, определяющая высокую степень его водонасыщения, способствует пониженной *морозостойкости* этого материала. Гипсобетоны на строительном гипсе выдерживают без разрушения около 10-15 циклов, морозостойкость несколько повышается с применением вяжущих, способных образовывать более прочную структуру – высокопрочного гипса, ангидритового вяжущего, эстрих-гипса. Использование водостойких гипсовых вяжущих (ГЦПВ, ГЩЦПВ) позволяет повысить морозостойкость бетонов до 40-45 циклов. Повышения морозостойкости гипсобетонов можно также достичь снижением водопотребности смеси за счет различных технологических приемов.

Долговечность гипсобетонов повышается при увеличении плотности и применении гидрофобизирующих добавок.

Повышенная *ползучесть* гипсобетонов, в основном, определяется теми же причинами, что и пониженная водостойкость. Пластические деформации образцов при длительном действии нагрузки про-

являются и значительно возрастают при увеличении влажности (даже незначительном до 0,5-1%).

Замена гипсового вяжущего на ГЦПВ и ГШЦПВ приводит к снижению ползучести и приближению ее к значениям, характерным для цементных бетонов. Снижению ползучести гипсобетонов способствуют также предохранение изделий от увлажнения и использование гидрофобизирующих добавок.

Применение стальной арматуры для армирования гипсовых изделий затруднено вследствие существенного различия коэффициентов термического расширения стали и гипса, высокой пористости гипсового камня и недостаточной его пассивирующей способности. Гипсовый камень образует при твердении среду, приближающуюся к нейтральной, что не защищает стальную арматуру от коррозии. В качестве арматуры гипсобетонных изделий перспективны минеральные и полимерные волокнистые материалы. В бетонах на ГЦПВ и ГШЦПВ арматура корродирует меньше, однако при использовании и этих вяжущих необходимо применять защитное покрытие арматурной стали.

### 11.5. Строительные растворы

Строительные растворы в отличие от бетонов не содержат крупного заполнителя и укладываются тонкими слоями, как правило, на основание без интенсивного механического воздействия. По ряду структурных особенностей и свойств строительные растворы близки к мелкозернистым бетонам. Сравнительно невысокая прочность распространенных видов растворов позволяет при их производстве успешно использовать местные вяжущие вещества и разнообразные промышленные отходы (золошлаковые, известково- и гипсосодержащие продукты и пр.).

В строительстве применяют, главным образом, известковые, гипсовые, цементные и смешанные (цементно-известковые, цементно-глиняные) растворы. Цементы используют как вяжущие для растворов, которые эксплуатируются при высокой влажности и растворов повышенной прочности.

Тяжелые растворы имеют среднюю плотность свыше 1500, а легкие меньше 1500 кг/м<sup>3</sup>. Для легких растворов заполнителями выступают природные или искусственные пористые пески.

По назначению строительные растворы классифицируют на кладочные, в том числе для монтажа крупнопанельных стен и других конструкций, отделочные и специальные. Среди специальных растворов в строительстве находят использования тампонажные, инъекционные, гидроизоляционные, жаростойкие, химически стойкие и пр. Регулирование свойств растворов достигается применением разнообразных химических добавок.

**Производство и основные свойства растворов.** Строительные растворы готовят в передвижных и стационарных растворосмесительных узлах и установках в виде готовых растворных смесей требуемой подвижности или в виде сухих смесей, которые замешивают водой перед использованием (рис. 11.59).

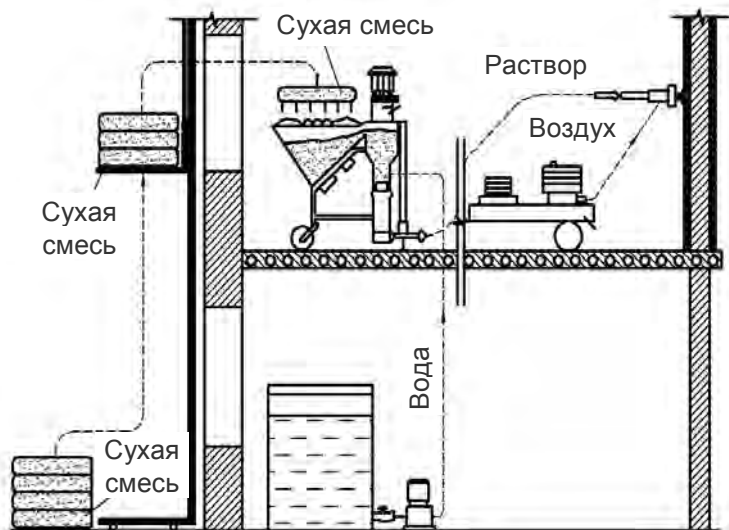


**Рис. 11.59.** Технологическая схема штукатурных работ с использованием сухих смесей

Технологический процесс приготовления готовой растворной смеси включает подготовку исходных материалов (отсев крупных включений из песка, подогрев его в зимнее время и т.д.), дозирование и тщательное перемешивание.

При централизованном приготовлении растворов широко применяют автоматизированные растворосмесительные установки. На

современных предприятиях составы и режимы изготовления растворов смесей, оптимальные маршруты и графики доставки растворов на объекты определяют с помощью компьютерных систем.

Основными свойствами растворов смесей являются подвижность, водоудерживающая способность, расслаиваемость, температура применения, средняя плотность, влажность (для сухих растворов смесей).

*Подвижность* (удобоукладываемость) – способность раствора укладываться на основание тонким однородным слоем - характеризуется глубиной погружения конуса высотой 15 см с углом при вершине 30°, и массой 300 г. Она назначается с учетом вида раствора, способа его подачи, влажности и пористости основания, температуры воздуха. Например, для монтажа стен из крупных панелей и блоков глубину погружения раствора назначают 5-7 см, а при кладке из обычного кирпича – 9-13 см.

В зависимости от подвижности по погружению конуса для растворов смесей могут быть установлены по ГОСТ 28013-98 марки Пк1, Пк2, Пк3 и Пк4. Погружение конуса для растворов смесей указанных марок должно быть соответственно: 1-4; св.4 до 8; св.8 до 12 и св. 12 до 14 см. Подвижность растворной смеси зависит прежде всего от ее водосодержания. Определенное влияние оказывают также вид вяжущего и заполнителя, массовое или объемное соотношение между вяжущим и заполнителем.

Обеспечение необходимой подвижности растворов смесей без расслоения можно достичь введением пластификаторов и наполнителей. Пластификаторы для растворов смесей используют двух видов: неорганические (известковое и глиняное тесто) и органические - поверхностно-активные вещества. Механизм действия неорганических пластификаторов состоит в образовании на поверхности частичек гидратных слоев, которые обеспечивают скольжение зерен заполнителя, а органических – в их разжижающем действии за счет преимущественно адсорбционного эффекта ПАВ. В отличие от неорганических органические пластификаторы вводят в растворные смеси в значительно меньшем количестве (0,03-0,3% от массы цемента).

Свойство растворной смеси сохранять необходимую подвижность от начала ее приготовления до укладки в конструкцию назы-



вают *жизнеспособностью*. Для цементных растворов жизнеспособность составляет обычно 2-4 ч и зависит от сроков схватывания цемента. Известковые растворы на гидратной извести имеют жизнеспособность 6-10 ч, смешанные цементно-известковые – 4-6 ч. Жизнеспособность растворных смесей зависит от состава смеси и температуры наружного воздуха и продлевается с помощью добавок ПАВ.

*Водоудерживающая способность* предотвращает расслоение растворной смеси. С этой целью уменьшают водовязущее отношение (за счет правильного подбора состава), вводят тонкодисперсные минеральные наполнители, пластифицирующие и специальные водоудерживающие добавки.

Водоудерживающая способность растворных смесей должна быть не менее 90%, глиносодержащих – не менее 93%.

В большинстве случаев растворы укладывают на пористое основание. При чрезмерно интенсивном отсасывании воды основанием затрудняется процесс нормального твердения цемента.

Водоудерживающую способность увеличивают путем введения в растворную смесь дисперсных минеральных добавок и пластификаторов.

Одновременно роль активной добавки, микронаполнителя и пластификатора в растворах может выполнять зола-унос. ее присутствие улучшает пластичность, водоудерживающую способность и прочие свойства растворов, позволяет существенно снизить расходы цемента и извести. Наиболее эффективными являются тонкозернистые золы, которые отбираются из последних полей электрофильтров.

С водоудерживающей способностью растворных смесей и в особенности с ее составом и водовязущим отношением связана *расслаиваемость* растворных смесей – их способность разделяться на твердую и жидкую фракции при транспортировании и перекачивании по трубам и шлангам. Расслаиваемость определяют при динамическом воздействии (вибрировании) на образец размером 150х150х150 мм и определении содержания заполнителя в нижней и верхней частях. Расслаиваемость свежеприготовленной растворной смеси не должна превышать 10%.

## 11. Композиционные материалы на основе вяжущих веществ

Необходимая температура растворной смеси нормируется в зависимости от среднесуточной температуры наружного воздуха, вида кладочного материала, скорости ветра (табл. 11.27).

Таблица 11.27

Требуемая температура растворной смеси

| Среднесуточная температура наружного воздуха, °С | Температура растворной смеси, °С, не менее |      |       |      |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|------|-------|------|
|                                                  | Кладочный материал                         |      |       |      |
|                                                  | кирпич                                     |      | камни |      |
|                                                  | при скорости ветра, м/с                    |      |       |      |
|                                                  | до 6                                       | св.6 | до 6  | св.6 |
| До -10                                           | 10                                         | 10   | 10    | 15   |
| От -10 до -20                                    | 10                                         | 15   | 15    | 20   |
| Ниже -20                                         | 15                                         | 20   | 20    | 25   |

**Примечания.** 1. Для кладочных растворных смесей при производстве монтажных работ температура должна быть на 10°С выше указанной в таблице. 2. Для штукатурных растворов при температуре наружного воздуха от 0 до 5°С температура растворной смеси должна быть не менее 15°С, от 5 и выше – плюс 10°С.

В зависимости от температуры изменяется интенсивность твердения растворов. Примерное значение *прочности* цементного раствора при сжатии в возрасте 28 сут. при различных температурах твердения по отношению к прочности раствора, твердевшего при 20°С, приведено в табл. 11.28.

Таблица 11.28

Влияние температуры на прочность при сжатии цементных растворов, %

| Температура твердения, °С | Возраст образцов, сут |    |    |    |     |
|---------------------------|-----------------------|----|----|----|-----|
|                           | 1                     | 3  | 7  | 14 | 28  |
| 1                         | 1                     | 5  | 15 | 31 | 52  |
| 5                         | 4                     | 11 | 25 | 60 | 68  |
| 10                        | 6                     | 18 | 37 | 71 | 83  |
| 15                        | 10                    | 24 | 47 | 80 | 95  |
| 20                        | 13                    | 33 | 55 | 86 | 100 |
| 25                        | 18                    | 42 | 64 | 92 | 104 |
| 30                        | 23                    | 49 | 72 | 96 | -   |
| 40                        | 32                    | 66 | 87 | -  | -   |

Интенсивность твердения растворов зависит от вида цемента и существенно снижается, особенно в области пониженных температур при применении шлакопортландцемента и пуццоланового цемента.

Нормируемые показатели качества затвердевших растворов на всех видах вяжущих кроме гипсовых и гипсосодержащих принимаются в 28 сут. Для растворов на гипсовых и гипсосодержащих вяжущих проектный возраст – 7 сут. Прочность растворов на сжатие в проектном возрасте характеризуют марками: М4, М10, М25, М75, М100, М150, М200.

Растворы М4 и М10 изготавливают преимущественно из извести. Марку растворов по прочности определяют на образцах – кубах с длиной ребра 70,7 мм или балочках размером 40×40×160 мм через 28 сут. твердения. При этом образцы из кладочных растворных смесей подвижностью меньше 4 см изготавливают в формах с поддоном, а свыше 4 см – без поддона и устанавливают на кирпич. В последнем случае поверхность кирпича служит водоотсасывающим основанием. Таким образом моделируются условия твердения растворов.

Прочность растворов, как и бетонов, зависит, главным образом, от активности вяжущего и водовяжущего отношения. Для прогнозирования прочности цементно-известковых строительных растворов широко используют формулы Н.А. Попова. При укладывании на плотное основание прочность растворов ( $R_p$ ) рассчитывают по формуле:

$$R_p = 0,25R_c(\text{Ц/В} - 0,4), \quad (11.45)$$

где  $R_c$  – активность цемента, Ц/В – цементно-водное отношение.

При отсасывании воды пористым основанием в растворах с различным Ц/В остается приблизительно одинаковое количество воды и прочность рассматривается в зависимости от расхода вяжущего:

$$R_p = KR_c(\text{Ц} - 0,05) + 4, \quad (11.46)$$

где  $K$  – коэффициент качества песка: для крупного песка  $K=2,2$ ; песка средней крупности  $K=1,8$ ; для мелкого песка  $K=1,4$ .

Для прогнозирования прочности цементных растворов, которые укладывают на плотное основание, можно использовать также формулу, предложенную Ю.М. Баженовым для мелкозернистых бетонов:

$$R_p = AR_c(\text{Ц/В} - 0,8), \quad (11.47)$$

где  $A$  – коэффициент, равный 0,8 для высококачественных материалов, 0,75 для материалов среднего качества и 0,65 для цемента низких марок и мелкого песка.

Для растворов на гидравлических вяжущих с марками по прочности выше М10 устанавливаются при необходимости марки по *морозостойкости* F10, F15, F25, F50, F75, F100, F150, F200. Морозостойкость строительных растворов определяют по количеству циклов переменного замораживания и оттаивания, которое выдерживают образцы-кубы с длиной ребра 70,7 мм при допустимом снижении прочности не больше 25% и потере массы не выше 5%. Марка раствора по морозостойкости зависит от условий эксплуатации. Для кладки стен и внешней штукатурки марку определяют, как правило, в диапазоне от F10 до F50, а при влажностном режиме эксплуатации – от F100 до F300. Морозостойкость растворов, как и морозостойкость бетонов, определяется видом вяжущего и добавок, водоцементным отношением, качеством заполнителя, условиями твердения. Она снижается при наличии недоуплотненностей, каверн и крупных пор, обусловленных недостаточной удобоукладываемостью.

Структуру растворов модифицируют добавки органических ПАВ. При этом снижается водопоглощение и капиллярное всасывание, возрастают морозостойкость и водонепроницаемость.

Составы строительных растворов подбирают по таблицам или расчетом и в обоих случаях уточняют экспериментальным путем применительно к конкретным материалам. В табл. 11.29 приведены примерные составы смешанных кладочных растворов марок М25...М100 в объемных частях (цемент: известковое тесто: песок).

Расход цемента на 1 м<sup>3</sup> песка в растворах на цементе и цементосодержащих вяжущих должен быть не менее 100 кг.

**Кладочные растворы.** Кладочные растворы применяют при каменной и кирпичной кладке, выполнении стыков и швов, устройстве выравнивающего слоя при монтаже железобетонных конструкций, омоноличивании колонн в фундаментных стаканах и т.п. При возведении стен наиболее широко используют смешанные цементно-известковые и цементно-глиняные растворы. *Цементные растворы* без неорганических пластифицирующих добавок целесообразны только для конструкций, возводимых ниже уровня грунтовых вод. *Известковые растворы* и растворы на различных извес-

тесодержащих вяжущих (известково-шлаковых, известково-золевых и пр.) применяют в малоэтажном строительстве. При этом воздушную известь используют в растворах для наземной кладки при относительной влажности воздуха в помещениях до 60%, гидравлические известкостержащие вяжущие – в растворах, которые работают во влажных условиях. Для получения строительных растворов из разновидностей цемента широко применяют портландцемент М300 и М400. Используют также специальные цементы для строительных растворов, которые содержат в значительном количестве активные минеральные добавки или микронаполнители.

Таблица 11.29

Составы смешанных (цементно-известковых и цементно-глиняных) растворов

| Область использования растворов                                                                             | Марка раствора | Составы растворов в объемной дозировке цемент: известь(глина): песок при марке вяжущего |           |            |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|-----------|
|                                                                                                             |                | 500                                                                                     | 400       | 300        | 200       |
| Для надземных конструкций при относительной влажности воздуха выше 60% и для фундаментов во влажных грунтах | 200            | 1:0,2:3                                                                                 | 1:0,1:2,5 | -          | -         |
|                                                                                                             | 150            | 1:0,3:4                                                                                 | 1:0,2:3   | 1:0,1:2,5  | -         |
|                                                                                                             | 100            | 1:0,5:5                                                                                 | 1:0,4:4,5 | 1:0,2:3,5  | -         |
|                                                                                                             | 75             | 1:0,8:7                                                                                 | 1:0,5:5,5 | 1:0,3:4    | 1:0,2:2,5 |
|                                                                                                             | 50             | -                                                                                       | 1:0,9:8   | 1:0,6:6    | 1:0,3:4   |
|                                                                                                             | 25             | -                                                                                       | -         | 1:1,4:10,5 | 1:0,8:7   |

Максимальный размер зерен песка в растворах для обычной кладки принимается не более 2,5 мм, в бутовой кладке – 5 мм.

Для экономии цемента и замены части песка в кладочные растворы можно вводить каменноугольную золу в количестве 100-200 кг/м<sup>3</sup>. Тонкозернистая зола может использоваться вместо части цемента и песка. Крупнозернистую золу рационально использовать вместо части песка без изменения расхода цемента. При использовании золы-уноса в цементных растворах необходимый расход цемента, как правило, снижается на 30-50 кг/м при одновременном улучшении удобоукладываемости растворной смеси. Перерасхода

цемента при полной замене песка золой можно избежать с помощью добавки небольшого количества известкового теста. При полной замене песка золой возрастают деформации усадки с течением времени и деформации при переменном увлажнении и высушивании. Они в 2-3 раза выше, чем в цементно-песчаных растворах.

В цементно-известковых растворах золой можно заменять часть цемента, извести или песка. При этом можно сэкономить до 30-50 кг цемента и 40-70 кг известкового теста на 1 м<sup>3</sup> раствора без ухудшения удобоукладываемости и прочности. Цементно-известково-золяные растворы характеризуются довольно низкой расслаиваемостью. Их применяют, так же как и растворы без добавок золы, главным образом, для кладки надземных частей зданий.

В известковых растворах применение золы-уноса позволяет снизить на 50% расход известкового теста без снижения прочности и ухудшения других свойств. При замене 50% извести удвоенным по массе количеством золы-уноса достигается не только экономия извести, но и повышение прочности раствора. Без применения цемента на известково-золяном вяжущем можно получить растворы марки М25 и выше.

Кроме золы-уноса, в строительных растворах эффективными являются добавки цементной пыли и других активных микронаполнителей.

Рост прочности кладочных растворов в зимнее время можно обеспечить введением ряда химических добавок (табл.11.30).

Как противоморозные добавки при приготовлении растворов в зимнее время используют нитрит натрия, поташ, мочевины, нитрит кальция с мочевиной, нитрит-нитрат-хлорид кальция (ННХК), хлориды натрия и кальция, а также некоторые другие соли. При этом необходимо учитывать ряд ограничений: растворы с хлоридами кальция, натрия или ННХК можно применять только для неармированных подземных конструкций, а также для кладки стен и колонн нежилых зданий, поташ нельзя использовать в количестве свыше 10% при кладке стен из силикатных изделий марки ниже 100 и в элементах конструкций, испытывающих увлажнение, а также в растворах с использованием заполнителей, которые содержат реакционноспособный кремнезем. Запрещается применять все виды добавок при возведении конструкций, которые эксплуатируются при температуре выше 40°C или влажности свыше 60%, в условиях

влияния агрессивных факторов, в зоне переменного уровня воды и под водой без специальной изоляции. Для конструкций, на поверхности которых не допускается образование высолов, раствор с добавкой должен быть предварительно испытан на высолообразование.

Таблица 11.30

Относительная прочность растворов с добавками  
в зависимости от температуры твердения

| Добавка                                         | Средне-<br>суточная<br>темпера-<br>тура, °С | Количество<br>добавки, % от<br>массы<br>цемента | Ориентировочная<br>прочность раствора,<br>% от его марки при<br>твердении, сут. |    |    |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----|----|
|                                                 |                                             |                                                 | 7                                                                               | 28 | 9  |
| Нитрит натрия                                   | 0...-5                                      | 5                                               | 10                                                                              | 40 | 5  |
|                                                 | -6...-9                                     | 8                                               | 5                                                                               | 30 | 4  |
|                                                 | -10...-15                                   | 10                                              | 5                                                                               | 30 | 4  |
| Поташ                                           | 0...-5                                      | 5                                               | 25                                                                              | 60 | 8  |
|                                                 | -6...-15                                    | 10                                              | 20                                                                              | 50 | 6  |
|                                                 | -16...-30                                   | 15                                              | 10                                                                              | 35 | 5  |
| Нитрит натрия<br>+поташ                         | 0...-5                                      | 2,5+2,5                                         | 20                                                                              | 50 | 7  |
|                                                 | -6...-15                                    | 5+5                                             | 15                                                                              | 40 | 6  |
|                                                 | -16...-30                                   | 6+6                                             | 5                                                                               | 35 | 4  |
| Хлористый на-<br>трий<br>+ хлористый<br>кальций | 0...-5                                      | 3+0                                             | 35                                                                              | 80 | 10 |
|                                                 | -6...-10                                    | 3,5+1,5                                         | 25                                                                              | 45 | 7  |
|                                                 | -11...-15                                   | 3+4,5                                           | 15                                                                              | 25 | 50 |

Средняя температура раствора (°С) с химическими добавками в момент укладки должна быть: при температуре воздуха до минус 10°С – не ниже 4-6; от минус 11 до минус 20°С – 9-11; ниже минус 20°С – 14-16.

**Отделочные растворы.** Отделочные растворы применяют для штукатурных покрытий стен и архитектурного оформления элементов зданий и сооружений. По назначению их делят на растворы для обычной и декоративной, внешней и внутренней штукатурки.

Штукатурное покрытие состоит из двух или более слоев. Сцепление с поверхностью основания обеспечивается подготовитель-

ным слоем (*набрызгом*) толщиной не более 5 мм по кирпичным и бетонным поверхностям и 9 мм по деревянным. Основной слой (*грунт*) толщиной 5-7 мм служит для получения ровной поверхности. Улучшенные виды штукатурок включают еще *накрывный слой* толщиной не более 2 мм.

Для приготовления штукатурных растворов, подачи их к рабочему месту и нанесения на обрабатываемую поверхность служат комплекты машин – штукатурные агрегаты и штукатурные станции.

Все виды штукатурных растворов должны иметь заданную подвижность (9-14 см), не расслаиваться в процессе производства, а также отвечать требованиям механизированного выполнения работ, обеспечивать необходимую прочность и хорошее сцепление с основанием.

Для набрызга применяют наиболее подвижный раствор, который заполняет все неровности поверхности и содержит избыточное количество воды, отсасываемой основанием. Слои грунта используют из относительно вязкого раствора для образования необходимой толщины штукатурки. Раствор для отделочного или т.н. накрывного слоя имеет консистенцию, позволяющую хорошо выравнивать грунт и заглаживать его поверхность. От вида штукатурного слоя зависит и предельная крупность песка. Для нижних слоев она составляет 2,5 мм, для накрывного слоя – 1,2 мм.

*Растворы для обычных штукатурок* делят на цементные, известковые, цементно-известковые, известково-гипсовые, гипсовые.

Цементные растворы применяют для внешних штукатурок, которые испытывают систематическое увлажнение и внутренних – в помещениях с относительной влажностью воздуха свыше 60%. Для повышения их водостойкости желательно использовать гидрофобизирующие добавки, например, кремнийорганические жидкости. Соотношение цемента и песка по объему принимают для набрызга 1:2,5-4, грунта 1:2-3, накрывного слоя 1:1-1,5.

Цементно-известковые растворы применяют при оштукатуривании как фасадов зданий, так и внутренних помещений. Введение извести резко повышает пластичность растворов. Содержание известкового теста зависит от назначения слоя. Для набрызга добавляют, как правило, 0,3-0,5 грунта, 0,7-1 накрывного слоя, 1-1,5 объемных частей извести. Готовят цементно-известковые растворы двумя способами: перемешивают сухую песчано-цементную смесь,



которую увлажняют известковым молоком до нужной подвижности, или добавляя цемент к известково-песчаному раствору.

Раствор на основе воздушной извести применяют для оштукатуривания поверхности в помещениях с относительной влажностью воздуха до 60%. Возможно использование их для внешних штукатурок, которые не испытывают систематическое увлажнение. Для набрызга используют составы, которые содержат на одну часть известкового теста с плотностью  $1400 \text{ кг/м}^3$  2,5-4, грунта 2-3 и накрывного слоя 1-2 объемных части песка. Известь лучше всего добавлять к раствору в виде известкового теста. Основным недостатком известковых растворов является медленное твердение. Для ускорения их твердения добавляют строительный гипс. Как правило, рекомендованные составы известково-гипсовых растворов в частях по объему следующие: для набрызга 1:(3,3-1):(2-3), грунта 1: (0,5-1,5):(1,5-2) и накрывного слоя 1:(1-1,5). Известково-гипсовые растворы наиболее эффективны при оштукатуривании деревянных поверхностей внутри помещений. Для повышения их водостойкости в раствор вводят гидравлические добавки: трепел, диатомит, шлаки, золы и пр.

В последние годы с разработкой эффективных добавок, регулирующих свойства гипсовых вяжущих для штукатурных покрытий все шире применяют гипсовые растворы. Увеличения сроков схватывания таких смесей, достигается введением добавок триполифосфата натрия, эфиров метилцеллюлозы и др. Последние также повышают водоудерживающую способность и пластифицируют смесь.

При отделке внешних и внутренних стен зданий применяют *декоративные растворы*. Вяжущими в декоративных растворах являются обычный, белый и цветные портландцементы. Цвет растворов могут придавать пигменты и заполнители из природных или дробленых материалов. Для придания блеска поверхности отделочного слоя добавляют слюду или дробленое стекло. Декоративные растворы для оштукатуривания фасадов изготавливают с прочностью не меньше М50, морозостойкостью F35 и выше.

Для декоративных штукатурок распространены известково-песчаные, терразитовые и камнеподобные декоративные растворы.

Из цветных известково-песчаных смесей изготавливают одно- или двухцветные штукатурки типа *сграффито*, в которых после

затвердевания покрывной слой процарапывают по определенному рисунку, нанесенному при помощи трафарета.

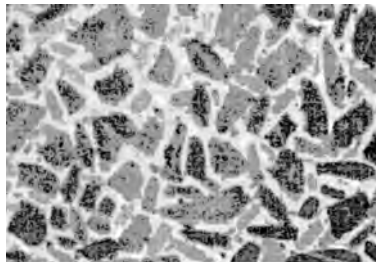
Для *терразитовых* штукатурок в состав вяжущего входят гидратная известь и портландцемент. Растворные смеси включают мраморную муку и крошку, кварцевый песок, пигменты, слюду. Их, как правило, готовят из предварительно подобранных сухих смесей. Обработывают терразитовую штукатурку пескоструйным аппаратом, гвоздевыми щетками, циклеванием зубьями пилы, после чего получают фактуру поверхности, которая имитирует обработанный песчаник или туф.

Фактура терразита зависит от предельной крупности зерен заполнителя. Мелкозернистые заполнители в терразитовых смесях включают зерна заполнителя 0,15-2 мм, среднезернистые – 2-4 мм, крупнозернистые – 4-6 мм. Крупнозернистый терразит (терразит К) при отделке фасадов используют для оштукатуривания цоколей и нижних этажей, среднезернистый (терразит С) – для поверхностей стен, мелкозернистый (терразит М) – для вытягивания карнизов. Для заводской отделки железобетонных панелей в процессе их формирования применяют терразитовые смеси, которые состоят из белого цемента и цветной каменной крошки в соотношении от 1:4 до 1:5.

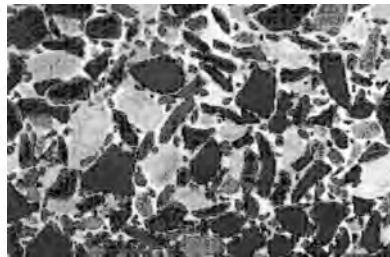
*Камнеподобные растворы* в штукатурке имитируют разные горные породы в зависимости от вида каменной крошки и способа обработки поверхности (рис. 11.60). Камнеподобные штукатурки применяют в основном для отделки фасадов и цоколей зданий. Основным вяжущим для них является цемент. Известковое тесто вводят в количестве 10-20% для придания смесям пластичности и разбеливания цемента. В качестве заполнителя используют, как правило, крошку той горной породы, которую имитируют. Важное значение при этом имеет зерновой состав каменной крошки, который должен учитывать способ обработки поверхности затвердевшего раствора и необходимую фактуру. При пескоструйной обработке поверхности желательно, чтобы в смесях содержалось не меньше 50% зерен крупностью 2,5-5 мм. Для мелкобороздчатой фактуры, которую можно получить циклеванием, размер зерен заполнителя не должен превышать 1,2 мм, для рельефных фактур применяют крупнозернистые смеси.

Для лучшего выделения каменной крошки отделочный слой протравливают 10-15%-ным раствором соляной кислоты.

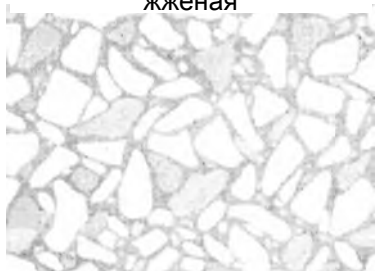
При заводской отделке фасадной поверхности панелей существует несколько способов получения камнеподобных покрытий: присыпка и углубление дробленого материала по свежееотформованному слою цементно-песчаного раствора, нанесенного на поверхность изделий; использование мелкозернистой крошки или саморазрушающихся паст, которые укладываются на поддон формы и пр.



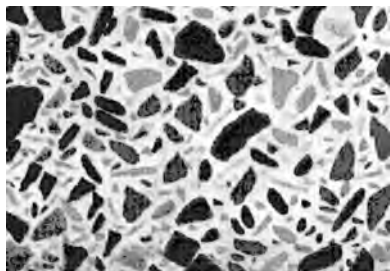
Мрамор красный, цемент белый, пигмент – кость жженая



Мрамор розовый, черный и желтый, цемент серый



Мрамор белый, цемент белый



Мрамор черный и серый, цемент белый, пигмент – мумия

**Рис. 11.60.** Растворные покрытия, имитирующие искусственный мрамор

*Растворы на основе коллоидно-цементного клея (КЦК) имеют повышенную прочность и адгезию к бетонам, сравнительно низкое водопоглощение. Физико-механические свойства этого раствора значительно выше, чем у других видов декоративных растворов.*

Коллоидный цементный клей готовят непосредственно перед его применением 5-6-минутным перемешиванием порошка с удельной поверхностью не меньше 5 тыс. см<sup>2</sup>/г, полученного при совместном помоле цемента и песка, с водой при водовяжущем отношении 0,35-0,50 в вибросмесителях или ультразвуковых активаторах.

Для *полимерцементных растворов* характерны улучшенные декоративные свойства, пониженная истираемость, высокая прочность на растяжение и изгиб, повышенная адгезия к различным основаниям, их изготавливают из смеси комплексного вяжущего (портландцемент и пластифицированная поливилацетатная дисперсия или латекс), наполнителей, заполнителей, пигментов и воды.

Полимерцементные смеси применяют для устройства полов в помещениях с интенсивным движением людей (вестибюли общественных зданий, магазины), транспорта на резиновых шинах и повышенными требованиями к чистоте.

Полимерцементные растворы применяют также для приклеивания различных отделочных материалов, отделки фасадной поверхности элементов зданий.

В современном строительстве для отделки зданий и сооружений широко используют *тонкослойные декоративные фасадные штукатурки*. Они выполняются обычно из готовых порошкообразных и мастичных (пастовых) смесей (рис. 11.61). Тонкослойные штукатурки обладают как декоративной, так и защитной функцией, образуют слой, стойкий к атмосферному, в том числе ультрафиолетовому воздействию, а также механическим повреждениям. Легкие штукатурки улучшают теплоизоляционные свойства стен, сохраняют нужный микроклимат внутри помещений, обеспечивают выполнение специальных требований: экранирование радиоволн, защиту от рентгеновского излучения, шума и т.д. Отдельную группу составляют штукатурки, применяемые в реставрационных работах. Одним из основных требований к декоративным штукатуркам при выполнении реставрационных работ является достаточная скорость диффузии водяного пара.

Тонкослойные штукатурки позволяют получать как разнообразную цветовую гамму, так и различные виды фактур (рис. 11.61) после затирки гладкой нержавеющей теркой. Распространены рустикальная (“короед”) и шероховатая (“барашек”) фактуры.

*Минеральные штукатурки* изготавливаются в виде сухих смесей на основе портландцемента и кварцевой или мраморной крошки с размером зерна до 1,5; 2 или 3 мм.

*Акриловые штукатурки* имеют консистенцию пасты и изготавливаются на основе водной дисперсии акриловых смол. Акриловые штукатурки образуют гидрофобное покрытие с большой стойкостью к механическим повреждениям. Однако они стареют под влиянием ультрафиолетовых лучей.

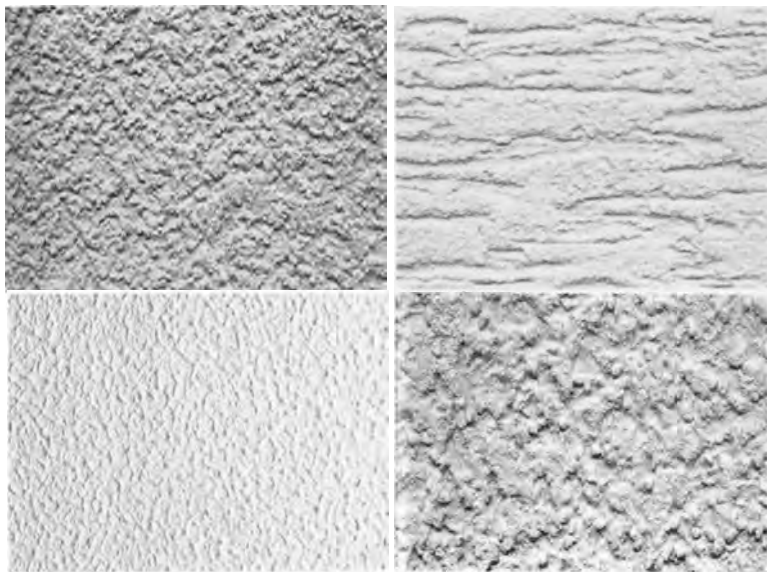


**Рис. 11.61.** Примеры декоративных тонкослойных штукатурок

*Силикатные и силиконовые штукатурки* применяют в виде готовых к применению масс, изготовленных соответственно на основе жидкого стекла и кремнийорганической смолы, мраморной, доломитовой и т.п. крошки. Образуют прочные поверхности с большой эластичностью, пропускающие водяной пар, стойки к мытью и биологической коррозии. Силиконовые штукатурки способны к самоочищению под влиянием атмосферных осадков.

Важный этап при использовании тонкослойных штукатурок – подготовка поверхности основания, которое должно быть чистым, прочным и ровным.

**Специальные растворы.** К специальным относят растворы для гидроизоляционных, инъекционных, тампонажных, кислотостойких,

жаростойких, теплозащитных, акустических, рентгенозащитных штукатурок.

*Гидроизоляционные растворы* применяют для создания гидроизоляционных покрытий железобетонных труб и других конструкций, для зачеканивания и гидроизоляции швов тубингов, раструбленных труб и т.п., для устройства торкретной оболочки бетонных подземных сооружений сильно фильтрующих воду или строящихся и эксплуатирующихся в условиях повышенной влажности. При выборе цемента для гидроизоляционных растворов важное значение имеет их активность. С повышением активности цемента водонепроницаемость растворов, как и бетонов, возрастает почти прямолинейно. При изготовлении гидроизоляционных растворов, предназначенных для службы в условиях агрессивных вод, применяют сульфатостойкие цементы. Первоочередное влияние на водонепроницаемость растворов имеет водоцементное отношение, с повышением которого в растворе развивается система пор и капилляров. Как правило, для гидроизоляционных растворов  $V/C=0,3-0,5$ .

Добавки для повышения водонепроницаемости растворов делят на микронаполнители, пластификаторы, кольматирующие, полимерные и комбинированные. Как микронаполнители используют обычно дешевые и доступные материалы – каменную муку, золунос. Роль микронаполнителей сводится к уплотнению и созданию тонкозернистой структуры растворов. Среди кольматирующих добавок распространены хлориды железа, алюминия и кальция. Гидроизоляционные растворы готовят также с использованием добавок жидкого стекла, алюмината натрия, азотнокислого кальция и других добавок.

Высокую гидроизоляционную способность имеют штукатурки на водонепроницаемом расширяющемся цементе (ВРЦ).

В особенности надежно работают штукатурки, нанесенные методом торкретирования. Их применяют для покрытия стен бассейнов, трубопроводов, туннелей, подвалов, которые испытывают действие грунтовых вод.

*Инъекционные растворы* служат для заполнения каналов предварительно напряженных железобетонных конструкций, обеспечения совместной работы арматуры с бетоном и защиты его от коррозии. Марка инъекционных растворов по прочности должна быть не меньше М300, а водоотделение – не больше 2%.

Для закрытия (тампонажа) водоносных трещин и пустот в горных породах с целью создания противофильтрационных завес в основаниях напорных сооружений, уплотнения и обжатия туннельных облицовок применяют *тампонажные растворы*.

Способ нагнетания под давлением в трещины и поры грунта или дефекты кладки цементных растворов носит название *цементации*. Этот способ широко распространен в гидротехническом строительстве для уплотнения грунтов, он позволяет возводить такие ответственные сооружения, как, например, высокие плотины на основаниях из трещиноватых пород при наличии неблагоприятных геологических факторов. Цементацию с успехом применяют и как способ устранения дефектов и повреждений бетона при строительстве и эксплуатации сооружений.

Комплекс требований к тампонажным растворам обеспечивают применением пластификаторов, высокодисперсных цемента и цементно-глиняных смесей, обработанных специальными реагентами, использованием скоростных турбулентных смесителей, которые обеспечивают более полное перемешивание и активизацию цемента в водной среде. При обычных условиях применяют портландцемент, в условиях напорных и агрессивных вод соответственно тампонажный, пуццолановый и шлакопортландцемент. Эффективными видами вяжущих для тампонажных растворов являются пластифицированный и гидрофобный цементы. Водоцементное отношение в тампонажных растворах принимается в зависимости от трещиноватости пород и колеблется от 0,8 при удельном водопоглощении менее 0,1 л/мин. до 0,5 при водопоглощении более 10 л/мин.

*Кислотостойкие растворы* получают из смеси кислотостойких заполнителей и дисперсных наполнителей с кремнефтористым натрием, которые замешиваются жидким стеклом.

Как заполнители кислотостойких растворов применяют кварцевый песок, а также пески, полученные дроблением гранита, андезита и других пород. Наполнителями могут быть тонкомолотый кварцевый песок, маршалит и прочие кремнеземистые порошкоподобные материалы. Содержание кремнефтористого натрия, необходимого для ускоренного твердения жидкого стекла, составляет около 15% его массы.

## 11. Композиционные материалы на основе вяжущих веществ

---

Для повышения водостойкости кислотостойких растворов вводят активные минеральные добавки – трепел, опоку, диатомит и пр. Полимерные добавки в кислотостойких растворах повышают их плотность и непроницаемость.

Для *теплозащитных штукатурок* применяют растворы с легкими заполнителями – перлитом, вермикулитом и др.

*Звукопоглощающие легкие растворы* со средней плотностью 600...1200 кг/м<sup>3</sup> используют для акустических штукатурок. Заполнителями в таких растворах являются пески с зернами крупностью от 3 до 5 мм из пористых материалов: пемзы, шлаков, вспученного перлита, керамзита и др.

*Биоцидные растворы* предназначены для применения в помещениях, где нежелательны такие процессы как гниение, брожение и т.п. (предприятия пищевой, биологической промышленности, водоснабжения и др.). Для придания биоцидных свойств растворных смесей вводят добавки, обладающие бактерицидной активностью (катапин и др.).

*Растворы для защиты от ионизирующих излучений* со средней плотностью 2200 кг/м<sup>3</sup> и больше применяют для оштукатуривания рентгеновских кабинетов и помещений, в которых ведут работы с радиоактивными изотопами. Как вяжущие материалы в таких растворах применяют портландцемент или шлакопортландцемент, а заполнителями выступают барит или другие тяжелые породы (например, магнетит) в виде песка и пыли с зернами не больше 1,25 мм.

### 11.6. Сухие строительные смеси

Современное строительство характеризуется все более широким применением сухих строительных смесей, тщательно сдозированных и перемешанных в заводских условиях и на строительной площадке лишь затворяемых водой.

При производстве строительных работ эффективность сухих смесей проявляется в высоком уровне механизации, существенном сокращении сроков строительства, снижении трудоемкости и производственных затрат, обеспечении высокого качества.



Сухие строительные смеси классифицируют по основному назначению, применяемому вяжущему и наибольшей крупности заполнителей.

В зависимости от назначения по ГОСТ 31189-2003 сухие смеси можно объединить в группы: для выравнивания стен и потолков (*выравнивающие*); отделки поверхности конструкций зданий и сооружений (*облицовочные*); устройства и отделки элементов пола (*напольные*); восстановления геометрических и эксплуатационных показателей конструкций (*ремонтные*); устройства защитных покрытий (*защитные*); кладочных и монтажных работ (*кладочные*); для проникающей гидроизоляции (*гидроизоляционные*); тепловой изоляции конструкций зданий и сооружений (*теплоизоляционные*); повышения прочности сцепления между основанием и покрытием (*грунтовочные*).

По применяемым вяжущим смеси подразделяют на цементные, гипсовые, известковые, полимерные, сложные – смеси на основе нескольких вяжущих веществ, при содержании каждого из них не менее 20%.

Вид вяжущего определяет условия твердения и эксплуатационные свойства сухих смесей, в том числе влажностный режим эксплуатации, морозостойкость, стойкость к циклическому увлажнению-высушиванию. Гидравлические вяжущие применяют для смесей, эксплуатируемых в сухих и влажных условиях, а воздушные - в сухих условиях.

По крупности заполнителей сухие смеси подразделяют на бетонные, расворные и дисперсные. Наибольшая крупность заполнителей должна быть не более 20 мм для бетонных смесей, 5 мм – для расворных и 0,63 мм – для дисперсных смесей.

Для изготовления сухих смесей в большинстве случаев используют обычный и белый портландцемент. Наиболее предпочтительно использование портландцемента без минеральных добавок, что обеспечивает требуемую стабильность химико-минералогического состава и свойств вяжущего. При необходимости обеспечить ускоренное твердение смесей применяют цементы повышенной дисперсности. Белый цемент используют для изготовления шпаклевок, декоративных штукатурок и специальных видов клея.

Для быстротвердеющих смесей, используемых для аварийно-ремонтных работ, расширяющихся композиций в качестве вяжущего применяют глиноземистый цемент.

Гипсовые вяжущие применяют как добавки в цементные смеси и как основные структурообразующие компоненты в шпаклевочных и других отделочных составах.

Для повышения пластичности цементных смесей и регулирования некоторых других свойств в сухие смеси вводят гидратную известь. Влажность извести должна быть не более 2%, высокие требования предъявляются к полноте гашения извести.

Полимерные вяжущие в сухих смесях применяют в порошкообразном состоянии.

В качестве наполнителей сухих смесей применяют кварцевый песок, мел, известняк, микрокремнезем, каолин, доломит, легкие минеральные материалы.

Наиболее широкая номенклатура сухих смесей производится с применением кварцевого песка. Нежелательно, как правило, содержание в песке глинистых (более 0,5-1,5%) и пылевидных примесей, резко повышающих водопотребность смесей и усадку, снижающих прочность сцепления покрытий с основанием, оказывающих отрицательное воздействие на их морозостойкость. В то же время некоторое увеличение в песке мелкозернистых фракций способствует повышению водоудерживающей способности смесей, их плотности.

Для защитно-отделочных составов наряду с кварцевым песком может применяться крошка горных пород (гранитная, мраморная и др.) с крупностью не более 2,5 мм. Вид наполнителя зависит от назначения сухой смеси. В сухих смесях находят также применение и органические волокнистые наполнители: полипропиленовые, акрилонитрильные, целлюлозные. Они оказывают положительное влияние на прочностные характеристики материалов, повышают их трещиностойкость, снижают усадку.

Влажность сухих смесей, содержащих не менее 80% цемента не должна превышать 0,2%, менее 80% – 0,3% по массе.

Регулирование строительно-технологических и эксплуатационных свойств растворных смесей и растворов на основе сухих смесей достигается введением разнообразных химических добавок.

Для смесей, наносимых тонким слоем на пористые поверхности, важно обеспечить необходимую водоудерживающую способность. Быстрое поглощение воды основанием не только приводит к утрате материалом пластичности, но и является причиной недостаточной гидратации вяжущего, снижения прочности, адгезии и морозостойкости. Модифицирование сухих смесей для улучшения их водоудерживающей способности и “жизнеспособности” достигается введением добавок на основе сложных *эфиров целлюлозы* – гидроксипропил – и гидроксипропилметилцеллюлозы в количестве 0,05-0,5%. Находит широкое применение *метилцеллюлоза* – простой метиловый эфир целлюлозы, хорошо растворимый в воде до плотности 1,29-1,31 г/см<sup>3</sup>, с насыпной массой 0,3-0,5 г/см<sup>3</sup>. При набухании в воде объем метилцеллюлозы увеличивается в десятки раз. Макромолекулы метилцеллюлозы даже в разбавленных водных растворах склонны к агрегации. Водные растворы стабильны при pH от 2 до 12. В водных растворах метилцеллюлоза обладает хорошими поверхностно-активными свойствами, при нагревании до температуры 35-36°C наблюдается желатинизация. С понижением температуры до температуры желатинизации гель разрушается. Метилцеллюлоза способна сохранять свои свойства после растворения в воде, повторного высушивания и диспергирования.

Для повышения водоудерживающей способности сухих смесей вводят также *бентонитовые глины* – природные алюмосиликаты, которые характеризуются высокой дисперсностью, набухаемостью, ионообменной способностью. Эти глины состоят из минералов группы монтмориллонита с общей формулой  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$ . В производстве сухих смесей рекомендуется использовать бентонитовые глины, модифицированные органическими основаниями. Они оказывают существенное, хотя и менее значительное влияние на водоудерживающую способность строительных растворов, чем метилцеллюлоза. Наряду с бентонитовыми роль загустителей, связывающих свободную воду в растворных смесях, выполняют монтмориллонитовые глины, микрокремнезем и др. В качестве загустителей совместно с эфирами целлюлозы в сухие смеси вводят также часто *эфиры крахмала* в количестве 5-20% от массы эфиров целлюлозы.

Более высокий уровень модификации обеспечивается путем введения в состав сухих смесей *редиспергируемых полимерных*

порошков (РПП), которые могут выступать в качестве добавки или самостоятельного полимерного вяжущего. Их получают высушиванием водных дисперсий полимеров обычно методом распылительной сушки. Они способны при замешивании водой создавать водные дисперсии, аналогичные исходным (редиспергироваться).

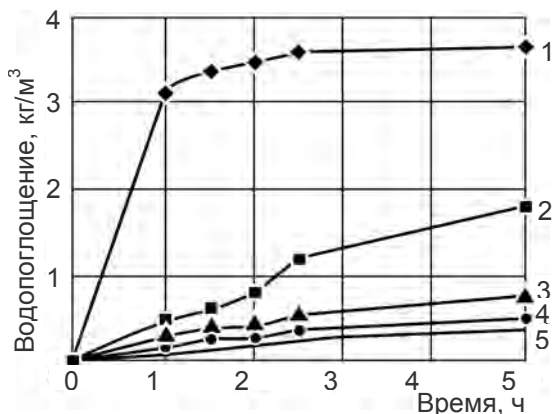


**Рис. 11.62.** Водопоглощение минеральных штукатурок в зависимости от содержания порошка редиспергуемого полимера:  
1 – содержание порошка 0,5%; 2 – 1%; 3-1,5%; 4-2%; 5-5%

Минеральные вяжущие не всегда удовлетворительно работают на растяжение и изгиб, имеют недостаточную адгезию особенно к таким материалам как глазурованная керамика, пластики, металлы, пенополистирол и т.п. При дозировке РПП от 0,5 до 5% значительно улучшаются технологичность смесей, адгезия к основанию, снижается водопоглощение (рис. 11.62, 11.63), повышаются прочность на изгиб, водостойкость, морозостойкость. При дозировке 5-7% редиспергируемые порошки начинают работать как самостоятельные полимерные вяжущие. Модифицированные ими материалы проявляют эластичные свойства, выдерживают большие деформирующие нагрузки, имеют повышенную стойкость против истирания. Модифицированные полимерами смеси устойчивы также к воздействию низких температур и бактериальных загрязнений.

Ряд химических добавок придают сухим смесям повышенную тиксотропность, обладают разжижающим эффектом, регулируют сроки схватывания, ускоряют твердение и др.

Рецептуры сухих смесей подбираются с учетом комплекса всех нормируемых требований для растворных и бетонных смесей определенного вида на их основе. Например, шпаклевочные смеси для выравнивания поверхностей различных конструкций должны:

- иметь сцепление (адгезию) с основанием не менее 0,5 МПа;
- паропроницаемость не менее 0,1 мг/м·ч·Па;
- быть морозостойкими (для внешних работ) и выдерживать не менее 50 циклов замораживания и оттаивания;
- легко укладываться на основание, не оставляя полос и не тянуться за инструментом;
- иметь стойкость к трещинообразованию и минимальную усадку, которая не должна превышать 0,2%;
- шлифоваться и окрашиваться в т.ч. красками на органических растворителях;
- не стекать с вертикальных поверхностей.

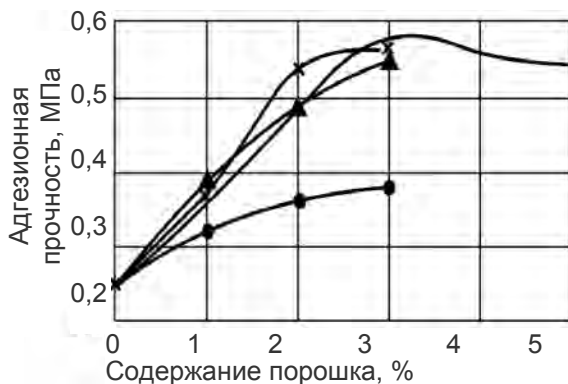


**Рис. 11.63.** Зависимость адгезионной прочности декоративных штукатурок к бетонной поверхности от количества РПП различных видов

Примеры рецептур шпаклевочных смесей, удовлетворяющих указанным требованиям, приведены в табл. 11.31.

## Примеры рецептов шпаклевочных смесей

| Наименование<br>компонентов сме-<br>сей                                                                                                             | Компонентный состав смесей, мас. % |                       |                                     |                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                     | Смеси на основе<br>цемента         |                       | Смеси на основе гипса               |                                                |
|                                                                                                                                                     | Шпаклевки<br>общего<br>назначения  | Шпаклевка<br>финишная | Шпаклевки<br>общего на-<br>значения | Шпаклевки<br>для заделки<br>трещин и<br>стыков |
| Портландцемент/<br>глиноземистый<br>цемент (соотно-<br>шение в зависимо-<br>сти от качества<br>цементов и необ-<br>ходимой скорости<br>схватывания) | 38-42                              | -                     | -                                   | -                                              |
| Белый цемент                                                                                                                                        | -                                  | 35-40                 | -                                   | -                                              |
| Гипс (полугидрат)                                                                                                                                   | -                                  | -                     | 30-45                               | 70-88                                          |
| Гидратная известь                                                                                                                                   | 0-10                               | 8-12                  | -                                   | 2-5                                            |
| Кварцевый песок<br>крупностью до 0,4<br>мм                                                                                                          | 44-48                              | 40-45                 | -                                   | -                                              |
| Молотая слюда,<br>мел                                                                                                                               | 0-10                               | 5-10                  | 50-65                               | 15-25                                          |
| Кварцевая мука                                                                                                                                      | 0-10                               | 5-10                  | -                                   | -                                              |
| Полимерные во-<br>локна                                                                                                                             | 0-1,5                              | 0-1,5                 | -                                   | -                                              |
| Полимерный ре-<br>диспергируемый<br>порошок                                                                                                         | 1-4                                | 3-5                   | 1-3                                 | 1-3                                            |
| Эфир целлюлозы                                                                                                                                      | 0,15-0,5                           | 0,15-0,5              | 0,5-0,8                             | 0,5-1,0                                        |
| Замедлитель<br>схватывания                                                                                                                          | -                                  | -                     | 0,01-0,05                           | -                                              |

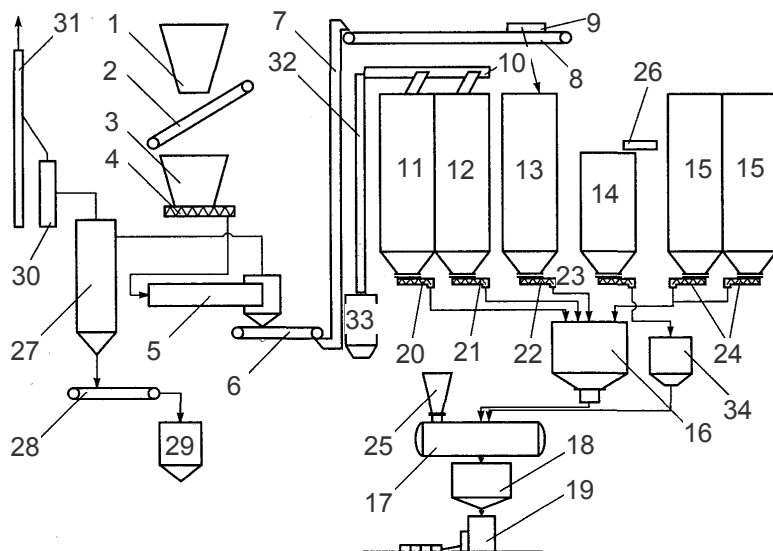


**Рис. 11.64.** Технологическая линия производства сухих строительных смесей: 1 – приемный бункер инертных заполнителей; 2, 6, 8, 28 – конвейеры; 3 – расходный бункер; 4 – шнековый питатель; 5 – сушильный барабан; 7 – элеватор; 9 – плужковый сбрасыватель; 10 – виброгрохот; 11-14 – силосы для заполнителей; 15 – силосы вяжущих; 16 – весовой дозатор; 17 – смеситель; 18 – бункер сухой смеси; 19 – фасовочная машина; 20-24 – шнеки-питатели; 25 – воронка для ввода химических добавок; 26 – устройство для раскладки мешков; 27 – система циклонов; 29 – бункер для пыли из циклонов; 30-37 – пылеосадительная система

Технологические линии по получению сухих смесей предусматривают хранение вяжущих и наполнителей в силосном складе, который рационально размещать над оборудованием для дозирования, смешивания и упаковки компонентов (рис. 11.64). Взвешивание компонентов осуществляют на бункерных весах, подача на которые осуществляется в режимах “грубого” и “тонкого” потоков. Смешивание сухих сыпучих материалов осуществляют в смесителях, обеспечивающих равномерное распределение добавок и диспергирование компонентов, склонных к слипанию и образованию комков. Оптимальный режим смешивания характеризуется высокими скоростями сдвига и обеспечивает при перемешивании взвешенное состояние компонентов. Смеси упаковываются в клапанные мешки на фасовочных машинах. Технологические линии оборудуются компьютерными системами управления.

## 12. МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ

В строительстве древесину широко применяют в виде пиломатериалов, фанеры, столярных изделий, клееных конструкций, сборных деревянных домов, изделий из отходов деревообработки и лесопиления.

Материалы из древесины отличаются от других ряд положительных особенностей: сравнительно высокая механическая прочность при небольшой средней плотности, способность легко обрабатываться, упругость, низкая теплопроводность, значительная устойчивость к попеременному замораживанию и оттаиванию и некоторым другим агрессивным воздействиям.

Присущие древесине недостатки в значительной мере устраняются путем ее модифицирования полимерными веществами, антисептиками, антипиренами.

С развитием производства современных строительных материалов применение древесины ограничивается лишь действительно рациональной областью, где ее технико-экономические преимущества становятся ощутимыми.

Все большее значение приобретает проблема утилизации отходов заготовки и переработки древесины, производства разнообразных материалов на их основе.

### 12.1. Строение и свойства древесины

*Древесиной* называют освобожденную от коры ткань волокон ствола дерева.

**Структура древесины.** Древесина характеризуется слоистоволокнистым строением и состоит из клеток (рис. 12.1, 12.2), которые имеют различную форму, величину и назначение. Так, 90-95% древесины хвойных пород составляют *трахеиды* – направленные вдоль ствола пустотелые клетки длиной 2-5 мм и шириной 30-70 мкм, проводящие при жизни дерева воду и растворы от корня к кроне. Оболочку клеток образуют преимущественно *клетчатка* или *целлюлоза* ( $C_6H_{10}O_5$ ) – главный компонент несущего остова дерева. В состав клеточных стенок и межклеточного вещества входят также полиса-



хариды – *лигнин* и *гемицеллюлоза* – сложные органические соединения, по составу близкие к целлюлозе.

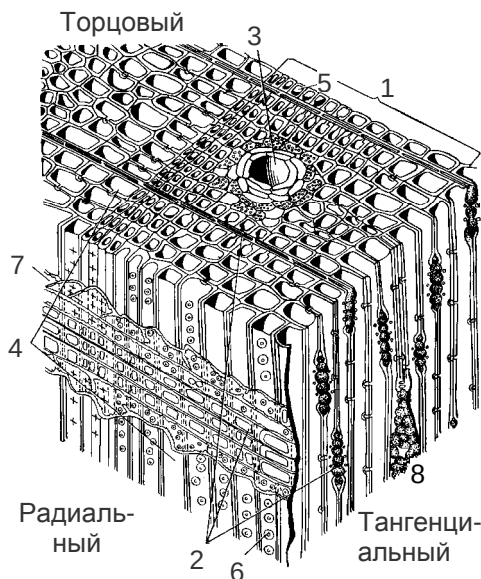


**Рис. 12.1** Схема микроскопического строения древесины сосны:

- 1 – годичный слой; 2 – сердцевинные лучи; 3 – вертикальный смоляной ход; 4 – ранние трахеиды; 5 – поздние трахеиды; 6 – окаймленная пора; 7 – лучевая трахеида; 8 – многорядный луч с горизонтальным смоляным ходом

Древесина снаружи покрыта *корой*, защищающей дерево от атмосферных и внешних механических действий. Кора включает два слоя: внешний – *корку*, выполняющую защитную функцию и внутренний – *луб*, активно участвующий в движении питательных веществ в дереве.

На границе между лубом и древесиной находится тонкий слой клеток, способных к делению и росту, называемый *камбием*. Камбий вызывает прирост массы древесины и коры.

Обычно древесина включает 40-50% целлюлозы, 20-30% лигнина и 15-30% гемицеллюлозы, 1-3% приходится на сопутствующие компоненты (смолы, масла, дубильные вещества и пр.).

Элементарный средний химический состав древесины практически одинаков для всех пород: 49,5% углерода, 44,08% кислорода, 0,12% азота и 6,3% водорода. Минеральные вещества, которые дают при сгорании древесины золу, составляют 0,2-1,7%.

Древесина является главной и наиболее емкой по массе частью ствола (рис. 12.3). Кроме нее, приблизительно в центре ствола находится *сердцевинная трубка*, имеющая обычно диаметр 2-5 мм. Это наиболее слабая, легко поддающаяся загниванию, часть ствола.

Древесину в зависимости от особенностей макроструктуры делят на три группы – ядровую, спелодревесную и заболонную. Древесина *ядровых* пород (сосна, кедр, лиственница, дуб, ясень, тополь и пр.) имеет более темную окраску центральной части – ядра и более светлую периферийной части – заболони. В раннем возрасте древе-

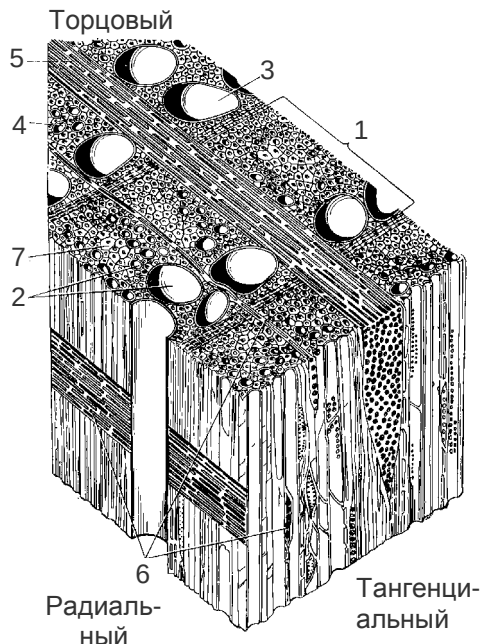


**Рис. 12.2.** Схема микроскопического строения древесины дуба: 1 – годичный слой; 2 – сосуды; 3 – крупный сосуд ранней зоны; 4 – мелкий сосуд поздней зоны; 5 – широкий сердцевинный луч; 6 – узкие сердцевинные лучи; 7 – либриформ (волокна)

*Заболонь* состоит из более молодых клеток и предназначена для движения влаги с растворенными в ней минеральными веществами. С возрастом заболонь постепенно переходит в ядро или спелую древесину. При одинаковой влажности заболонная древесина по многим механическим свойствам приближается к ядровой. Устойчивость ее против загнивания меньше, но она легче пропитывается

сина всех пород слагается только из заболони. Ядро образуется, например, у сосны в возрасте 30-35 лет, у дуба – в 8-12 лет. Оно состоит из отмерших клеток, пропитанных и закупоренных отложениями смолы, углекислого кальция, дубильных и других веществ. Ядро имеет повышенную плотность и устойчивость против загнивания.

Если центральная часть древесины имеет одинаковый цвет с периферийной и отличается только меньшей влажностью, она называется не ядром, а *спелой древесиной*. В группу спелодревесных пород входят ель, пихта, бук, липа, осина и пр. Спелая древесина, так же как и ядро, является более плотной частью ствола и не принимает участия в сокопроводящей сети.

антисептическими веществами. К заболонным лесным породам, которые практически имеют одинаковую по окраске и влажности древесину как в центре, так и на периферии, относятся кедр, ольха, граб и пр.

Древесина состоит из отдельных годовых слоев, которые разли-

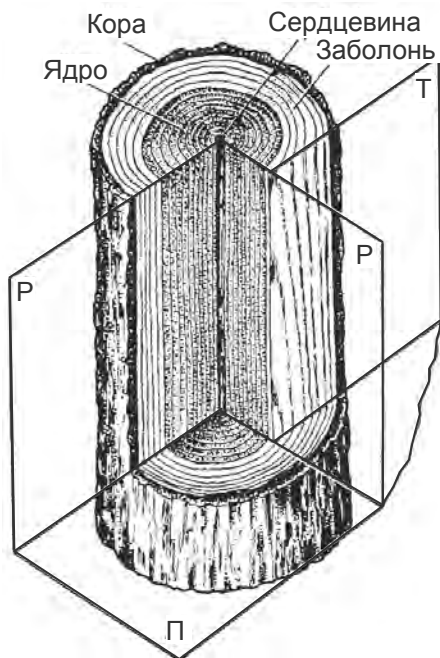


**Рис. 12.3.** Основные части ствола и главные разрезы:

П – поперечный; Р - радиальный;  
Т – тангенциальный

чаются невооруженным глазом во многих породах и в особенности хвойных. На поперечном разрезе ствола эти слои имеют вид концентрических колец, окружающих сердцевину. Годовые слои включают две части – раннюю и позднюю древесину. Ранняя древесина образуется весной, она светлее и мягче чем поздняя, образуемая только в конце лета. В особенности сильно ощущается это различие у хвойных пород.

Состав поздней древесины в значительной мере определяет физико-механические свойства древесины в целом. В поздней древесине хвойных пород сосредоточены смоляные ходы. Смола, заполняющая их, уменьшает водопоглощение

древесины, увеличивает устойчивость ее к загниванию. Для всех пород древесины характерно наличие лучей – линий, которые радиально расходятся к коре непосредственно от сердцевины или на некотором отдалении от нее. Они служат для проведения водных растворов питательных веществ в горизонтальном направлении. Древесина легко раскалывается по сердцевинным лучам и дает трещины при усуш-

ке, так как клетки, которые входят в них, связаны между собой сравнительно слабо.

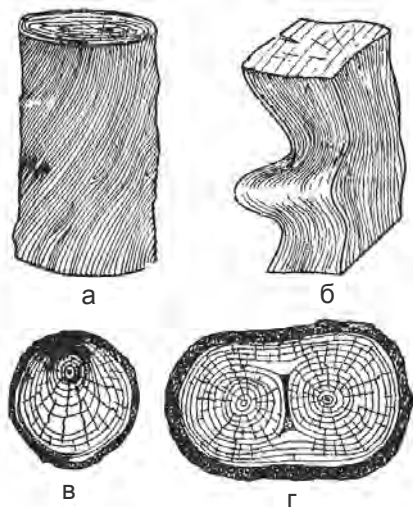


**Рис. 12.4.** Пороки строения древесины: а – наклон волокон; б – свилеватость; в – крень; г – двойная сердцевина

В древесине лиственных пород, кроме сердцевинных лучей, ослабленными элементами структуры являются сосуды – трубчатые образования клеток диаметром 0,1-0,4 мм и длиной обычно до 10 см, направленные вдоль ствола.

**Пороки древесины.** К порокам древесины относят дефекты ее строения, нарушения целостности, повреждения и болезни, то есть недостатки, которые снижают качество лесоматериалов (рис. 12.4, 12.5). Согласно действующей классификации все пороки древесины делятся на группы: сучки, грибные поражения и гнили, химические окраски, повреждения насекомыми,

деформации, трещины, дефекты формы ствола, раны, ненормальные отложения и др.

Основным сортоопределяющим пороком древесины является *сучковатость*. Отрицательное влияние сучков заключается в ухудшении механических свойств древесины вследствие нарушения однородности и искривления волокон. Сучки мешают также обработке древесины, а в некоторых случаях сопровождаются внутренней гнилью. В характеристике сучковатости древесины указывается вид сучков (форма, степень зарастания, состояние древесины), их размеры и число.

Гниение древесины сказывается в постепенном изменении ее цвета, уменьшении средней плотности и прочности.

*Гнили* вызываются развитием в древесине простейших растительных организмов-грибов. Грибы, которые поражают древесину, не содержат хлорофилл и не могут сами синтезировать органиче-

ские вещества. Вследствие этого они вынуждены питаться готовыми органическими соединениями, которые грибы берут из живых или отмерших растений.

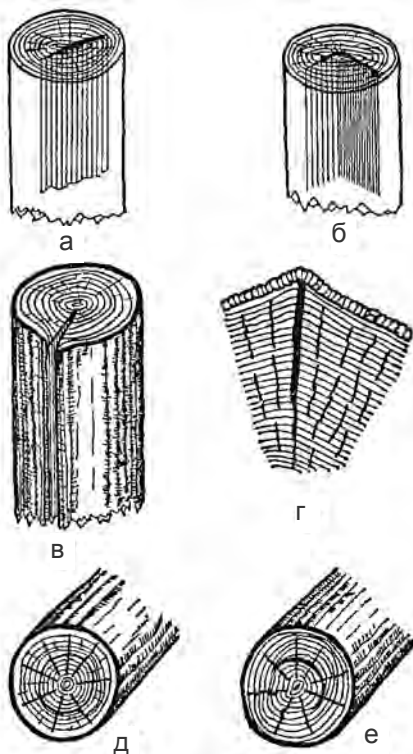


**Рис. 12.5.** Типы трещин:  
а, б – метиковая простая и сложная; в, г – морозная простая и сложная; д, е – отлупная кольцевая и частичная

Развитие грибов в древесине происходит только при определенной влажности (обычно 25-70%) и температуре воздуха в среднем от 5 до 25°C. В воде загнивания не происходит, так как прекращается доступ кислорода, необходимого для жизнедеятельности грибов. Развитие грибов прекращается также при температуре ниже 0°C и выше 40-45°C. Химизм гниения древесины состоит в ее разложении с выделением свободного углекислого газа и воды.

Различают деструктивную и коррозионную гниль. Первую порождают грибы, которые разрушают клетчатку умершей древесины, причиной второй являются лесные грибы, паразитирующие на живой древесине и питающиеся, главным образом, лигнином.

Деструктивная гниль характеризуется призматиче-

ским растрескиванием и потемнением древесины, а коррозионная сопровождается расслоением дерева по годовым кольцам с окраской его в бурые и коричневые цвета.

Наряду с дереворазрушающими есть группа деревоокрашивающих грибов, которые придают древесине разнообразные окраски и почти не ухудшают ее физико-механических свойств. Разновидно-

## 12. Материалы на основе древесины

---

стью окрасок древесины является *плесень*, которая встречается на сырой заболони всех пород и вызывается, в основном, плодоношениями.

Повреждения древесины насекомыми носят название *червоточин*. Главную массу насекомых-вредителей древесины составляют различные виды жуков (короеды, дубоеды, точильщики и пр.).

В морях древесину поражают некоторые моллюски или ракообразные (морской шашень, морской рачок, мокрица и др.).

По степени повреждения древесины устанавливают разновидность червоточин (поверхностная – до 3 мм, неглубокая – до 5 мм, глубокая (трухлявая) – больше 5 мм) – и подсчитывают число отверстий.

Деформации и растрескивание – группа пороков, являющихся следствием изменения формы или нарушения плотности древесины. Они возникают под действием значительных внутренних напряжений, которые образуются в процессе роста деревьев, при резком изменении температур, неравномерном удалении влаги.

*Трещины* (рис. 12.5) различают метиковые, отлупные и морозные, образующиеся в молодом дереве и трещины высыхания, которые возникают в срубленной древесине. Метиковые трещины имеют радиальное направление и наблюдаются только на торцах, поскольку начинаются от сердцевины и не доходят до коры. Отлупные трещины также являются внутренними, но они идут по годовым слоям перпендикулярно радиусу.

В отличие от метика и отлупа, морозные трещины и трещины высыхания представляют собой внешние продольные разрывы, которые распространяются от боковой поверхности вглубь материала в радиальных направлениях.

На механические свойства древесины влияют число, характер и размеры трещин, а также их направление по отношению к действующим силам. Так, при изгибе наиболее отрицательное влияние оказывают трещины нейтральной зоны в плоскости, перпендикулярной изгибающему усилию. Наименьшее влияние оказывают трещины, расположенные в плоскости, совпадающей с направлением усилия.

К порокам формы ствола относят сбежистость, закомелистость, наросты и кривизну, а к порокам строения древесины – наклон волокон, свилеватость, завиток, крень и др. Эти пороки могут привес-

ти к увеличению затрат сырья при распиловке древесины, снижению прочности и другим нежелательным явлениям.

**Физико-механические свойства древесины.** На физические и механические свойства, а также пригодность древесины к использованию влияет ее *влажность*. Для свежесрубленных деревьев влажность колеблется от 30 (дуб) до 45% (ель). Воздушно-сухая древесина, длительное время лежавшая на воздухе имеет влажность 15-20%.

Различают гигроскопическую (связанную) и свободную влагу в древесине. Гигроскопическая влага пропитывает оболочки клеток и удерживается физико-химической связью. Максимальное количество гигроскопической влаги, которое может быть поглощено древесиной при ее выдерживании на воздухе, насыщенном водными парами, носит название точки насыщения клеточных оболочек или *предела гигроскопичности*. Максимальная влажность кле-

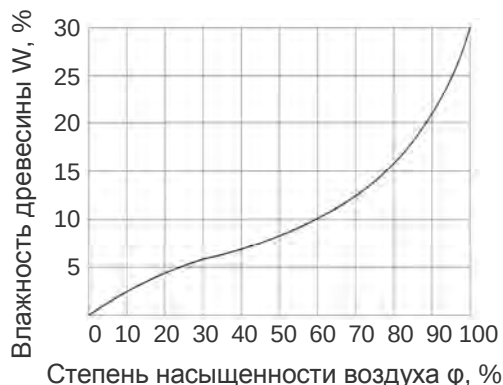


**Рис. 12.6.** Изотерма сорбции древесины

точных стенок свежесрубленной древесины или увлажненной путем выдерживания в воде носит название *предела насыщения*. При температуре 15-20°C влажность древесины, соответствующая пределам насыщения и гигроскопичности, практически одинаковая и в среднем для всех пород древесины равна 30% (рис. 12.6).

В отличие от связанной, свободная вода заполняет каналы сосудов и межклеточное пространство и удерживается физико-механическими силами. Удаление свободной воды требует меньших энергетических затрат, поэтому ее влияние на свойства древесины значительно менее существенно. При высыхании на первых порах преимущественно удаляется свободная вода, а потом связанная. Процесс высыхания древесины прекращается при достижении ею равновесной влажности, то есть влажности окружающего возду-

## 12. Материалы на основе древесины

ха. Значение равновесной влажности можно находить по специальным диаграммам (рис. 12.7).

При удалении из древесины связанной влаги происходит *усушка*, то есть сокращение размеров лесоматериалов.

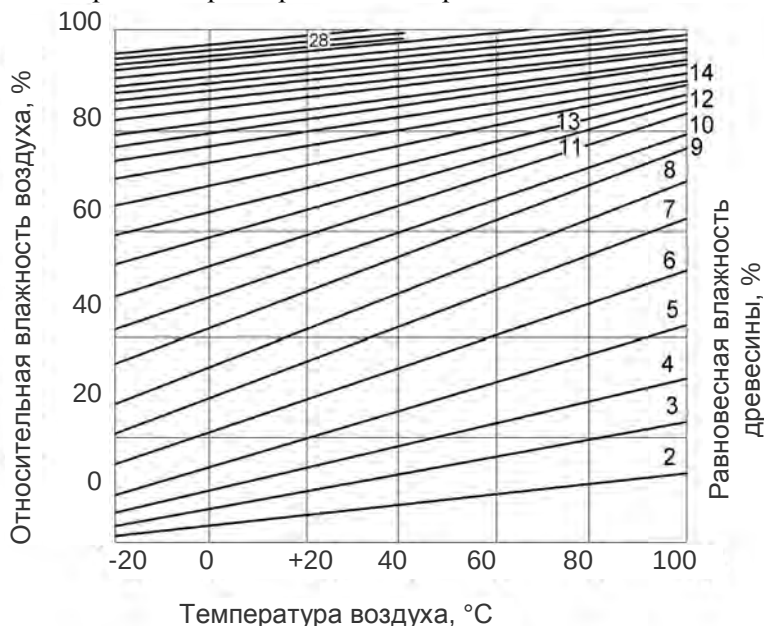


**Рис. 12.7.** Диаграмма зависимости влажности древесины от температуры и относительной влажности воздуха

Наоборот, при увлажнении древесины стенки клеток утолщаются, что вызывает *набухание* (рис. 12.8). Влажностные деформации наиболее существенны поперек волокон. Так, полная линейная усушка древесины в тангенциальном направлении составляет 6...10%, а вдоль волокон – всего 0,1-0,63%. Значения усушки и набухания возрастают также с увеличением средней плотности древесины.

Влажностные деформации могут быть рассчитаны с помощью коэффициентов усушки  $K_y$  и набухания  $K_n$ , характеризующих соответствующие деформации при снижении или увеличении содержания связанной влаги в древесине на 1%.

Соотношение между  $K_y$  и  $K_n$  определяется по формуле:



$$K_y = \frac{100K_n}{100 + 30K_n} \quad (12.1)$$

Коэффициенты объемной усушки некоторых распространенных пород древесины и другие их физико-механические свойства приведены в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Физико-механические свойства древесины

| Породы древесины | Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> | Коэффициент объемной усушки | Предел прочности вдоль волокон, МПа, при |            |                    |                         |
|------------------|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|------------|--------------------|-------------------------|
|                  |                                      |                             | Сжатии                                   | Растяжении | Статическом изгибе | Радиальном расслаивании |
| Хвойные:         |                                      |                             |                                          |            |                    |                         |
| Лиственница      | 660                                  | 0,52                        | 64                                       | 125        | 111                | 9,9                     |
| Сосна обычная    | 550                                  | 0,44                        | 48                                       | 104        | 86                 | 7,5                     |
| Ель              | 445                                  | 0,43                        | 45                                       | 103        | 79                 | 6,9                     |
| Пихта сибирская  | 375                                  | 0,39                        | 39                                       | 67         | 68                 | 6,4                     |
| Кедр сибирский   | 440                                  | 0,42                        | 38                                       | 78         | 62                 | 6,2                     |
| Лиственные:      |                                      |                             |                                          |            |                    |                         |
| Дуб              | 690                                  | 0,43                        | 57                                       | 123        | 108                | 10,2                    |
| Береза           | 630                                  | 0,54                        | 55                                       | 168        | 110                | 9,3                     |
| Бук              | 670                                  | 0,47                        | 55                                       | 123        | 108                | 11,6                    |
| Липа             | 495                                  | 0,49                        | 45                                       | 121        | 88                 | 8,6                     |
| Ольха            | 520                                  | 0,43                        | 44                                       | 101        | 80                 | 8,1                     |
| Осина            | 495                                  | 0,41                        | 42                                       | 125        | 78                 | 6,3                     |
| Тополь           | 440                                  | 0,42                        | 39                                       | 88         | 62                 | 6,1                     |
| Ясень            | 690                                  | 0,48                        | 52                                       | 140        | 182                | 12,2                    |

При высыхании, вследствие неравномерности распределения влажности по сечению древесины и ее анизотропности, в ней появляются внутренние напряжения. Развитие этих напряжений может

## 12. Материалы на основе древесины

вызывать растрескивание и коробление лесоматериалов. Для предотвращения этих дефектов особое значение имеет режим сушки древесины. Сушка – одна из наиболее ответственных и трудоемких операций в технологии деревообработки. Для столярных изделий

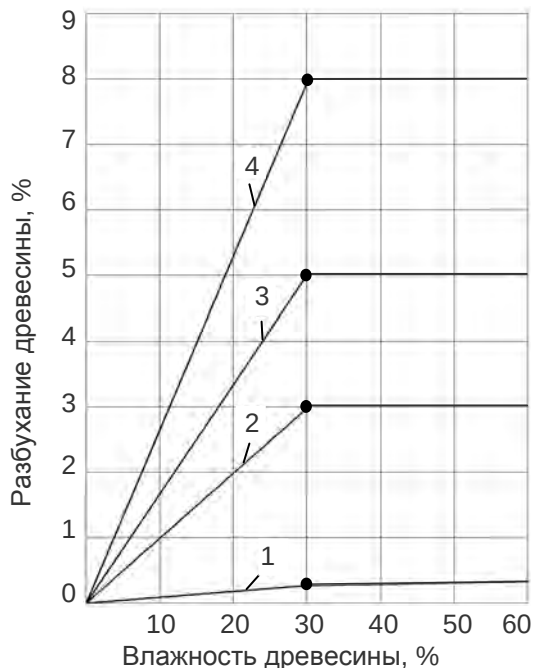


**Рис. 12.8.** Линейные и объемные деформации набухания древесины: 1 – вдоль волокон; 2 – в радиальном направлении; 3 – в тангенциальном направлении; 4 – объемные

Коэффициент линейного расширения древесины вдоль волокон составляет всего  $(3...5) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , то есть в 3-10 раз меньше, чем для металла, бетона и стекла, благодаря чему в деревянных зданиях и сооружениях можно не устраивать температурных швов. В поперечном направлении волокон изменение линейных размеров в 7-10 раз больше, чем в продольном.

Сухая древесина имеет очень малую *электропроводность*, приблизительно такую же, как хорошие электроизоляционные мате-

влажность не должна превышать 8-10%, а для наружных конструкций – 15-18%.

При расчете процессов сушки и пропитки древесины необходимо знать ее тепловые свойства. Вследствие пористого строения древесина плохо проводит тепло. Малая *теплопроводность* древесины, в особенности поперек волокон (рис. 12.9), обуславливает широкое применение ее в ограждающих конструкциях зданий. Деревянный брус толщиной 15 см эквивалентен по теплопроводности каменной стене толщиной в 2,5 кирпича.

риалы. Однако с повышением влажности электропроводность ее возрастает. При влажности, которая соответствует пределу насыщения, она в десятки миллионов раз больше электропроводности сухого материала.



**Рис. 12.9.** Зависимость теплопроводности древесины поперек волокон от плотности в абсолютно сухом состоянии

*Плотность* древесины определяется совокупностью веществ, составляющих оболочки клеток. Поскольку эти вещества имеют практически одинаковый состав для всех пород, истинная плотность древесины колеблется в узких границах – от 1,49 до 1,56 г/см<sup>3</sup> и равна в среднем 1,53 г/см<sup>3</sup>.

Средняя плотность древесины зависит от влажности и пористости породы. Значение средней плотности указывается при стандартной 12%-ной влажности ( $\rho_{0(12)}$ ). В диапазоне от нулевой до 30%-ной влажности применяют формулу пересчета:

$$\rho_{0(12)} = \rho_{0(w)} [1 + 0,01(1 - K_y)(12 - W)], \quad (12.2)$$

где  $K_y$  – коэффициент объемной усушки;  $W$  – влажность.

При влажности древесины больше 30% для пересчета средней плотности можно использовать формулу:

$$\rho_{0(12)} = \frac{A \rho_{0(w)}}{1 + 0,01W}, \quad (12.3)$$

## 12. Материалы на основе древесины

где  $A = 1,222$  для березы, бука, лиственницы, белой акации;  $1,203$  – для других пород.

По средней плотности древесины все породы условно делят на три группы: легкие ( $\rho_0 < 550 \text{ кг/м}^3$ ), средние ( $\rho_0 = 550\text{--}750 \text{ кг/м}^3$ ) и тяжелые ( $\rho_0 > 750 \text{ кг/м}^3$ ).

Показатели механических свойств древесины, также как и физические свойства, зависят от влажности, причем влияет, в основном, только связанная вода, которая находится в клеточных стенках. Увеличение содержания связанной воды резко уменьшает показатели всех механических свойств (рис. 12.10). Прочность древесины в зависимости от изменения влажности можно рассчитать по формуле:

$$R_w = \frac{R_{12}}{1 + \alpha(W - 12)}, \quad (12.4)$$

где  $R_w$  и  $R_{12}$  – предел прочности древесины соответственно при влажности  $W$  и  $12\%$ ;  $\alpha$  – коэффициент снижения прочности древесины при возрастании ее влажности на  $1\%$  (для предела прочности при сжатии вдоль волокон и статического изгиба  $\alpha = 0,04$ ; при растяжении вдоль волокон  $\alpha = 0,01$ ).

Вследствие структурных особенностей механические свойства древесины зависят также от угла между направлением действующего усилия и направлением волокон.

Наиболее важным и характерным механическим свойством древесины является прочность при сжатии вдоль волокон. Она является определяющей для свай, ферм, колонн, стоек и других деревянных конструкций.

При действии сжимающих усилий поперек волокон в большинстве случаев

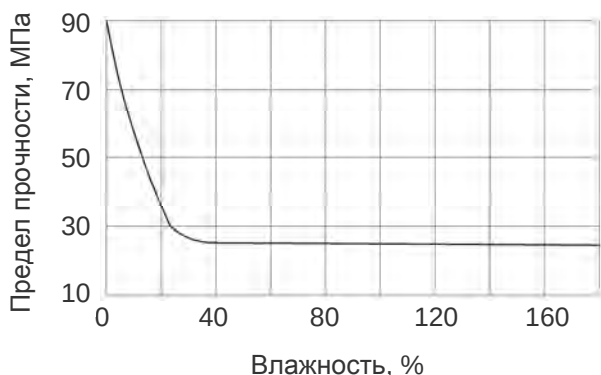


**Рис. 12.10.** Влияние влажности древесины на прочность при сжатии вдоль волокон

не удается выявить разрушения, поэтому ограничиваются определением предела пропорциональности, который принимают за условный предел прочности (рис. 12.11). Условный предел прочности на сжатие поперек волокон в среднем для всех пород приблизительно в 10 раз меньше предела прочности на сжатие вдоль волокон.

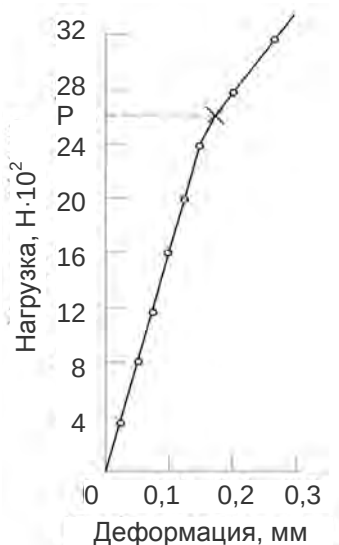


**Рис. 12.11.** Диаграмма сжатия древесины поперек волокон: Р – нагрузка, соответствующая условному пределу прочности

Прочность древесины на сжатие поперек волокон имеет практическое значение в местах врубок или соединений деревянных деталей с металлическими (под башмаками, болтами, и т.п.), для железнодорожных шпал и пр.

Предел прочности древесины при растяжении вдоль волокон примерно в 2 и больше раз выше, чем при сжатии (табл. 12.1). Для сосны и ели, например, он равен в среднем около 100 МПа. При растяжении поперек волокон предел прочности в 10-40 раз меньше. При этом прочность в радиальной плоскости у всех пород выше, чем при растяжении в тангенциальной плоскости. Это вы-

звано тем, что в последнем случае проходит разрыв слабых сердцевинных лучей, тогда как в радиальной плоскости он идет по ранней и плотной поздней зоне. Сопротивление растяжению в особенности сильно снижается при наличии сучков и косослоя.

Древесина в конструкциях и изделиях редко работает на растяжение. Это обусловлено трудностью предотвращения разрушения деталей в местах закрепления. Показатели прочности древесины на растяжение поперек волокон учитываются для предотвращения ее растрескивания при интенсивных режимах сушки.

Древесина широко применяется для конструкций, которые работают на поперечный изгиб; в междуэтажных перекрытиях, в мосто-

## 12. Материалы на основе древесины

---

вых фермах, эстакадах и т.д. Прочность древесины при поперечном статическом изгибе является средней между прочностью при растяжении и сжатии вдоль волокон. В среднем для различных пород она может быть принята равной приблизительно 90 МПа.

Для расчета деревянных конструкций в некоторых случаях важна прочность древесины при сдвиге и кручении. Наиболее распространенным видом испытаний на сдвиг является скалывание вдоль волокон, сопротивление которому составляет приблизительно 0,15 предела прочности при сжатии. Прочность при кручении для основных пород почти в 1,5 раз выше прочности при скалывании.

При обработке режущими инструментами и при истирающих воздействиях важна *твердость* древесины. Это свойство определяется на образцах-кубах методом вдавливания. Самая большая твердость (50-90 МПа) присуща ясеню, буку, вязу, лиственнице.

Для древесины, в особенности при работе во влажных условиях, характерна *ползучесть*, которая приводит к заметным деформациям конструкций при продолжительном нагружении.

Древесина при работе в сухих помещениях, на открытом воздухе, а также в подземных и подводных сооружениях, в условиях, которые исключают образование грибов, характеризуется высокой *стойкостью*. Механические свойства древесины изменяются значительно после пребывания в речной воде лишь на протяжении нескольких сот лет. Морская вода уже через сравнительно короткий срок заметно ухудшает свойства древесины.

При действии кислот и щелочей механические свойства древесины ухудшаются по мере увеличения их концентрации. Коррозионная стойкость лиственных пород ниже, чем хвойных.

Для одной и той же породы стойкость древесины зависит от ее плотности. Стойкость увеличивается с возрастом дерева, при передвижении от заболони к ядру и от нижней части ствола к верхней.

Один из эффективных способов значительного улучшения свойств древесины – *модифицирование* ее синтетическими полимерами. Суть модифицирования состоит в том, что натуральная древесина пропитывается мономером или маловязким полимером, переводимыми затем в твердое состояние под действием тепла, химических реагентов или ионизирующих излучений. Соответственно различают термохимический и радиационно-химический методы модифицирования древесины. Для модифицирования древесины

используют фенольные, карбамидные, фурановые, полиэфирные, полиакриловые и другие полимеры (олигомеры), а также некоторые мономеры – стирол, метилметакрилат, акрилонитрил.

Модифицированная древесина имеет в несколько раз большую прочность, твердость, ударную вязкость, пониженную гигроскопичность и водопоглощение.

Древесина различных пород в зависимости от химического состава и строения имеет различную стойкость к гниению и воспламеняемости. По стойкости к гниению породы подразделяют на группы: наиболее стойкие (тис, кедр, дуб, карагач), среднестойкие (сосна, ель, ольха) и малоустойчивые (береза, бук, осина, липа, клен).

К способам защиты древесины от гниения, поражения насекомыми и воспламенения можно отнести сушку, конструктивные методы предотвращения увлажнения конструкций во время эксплуатации, пропитку древесины антисептиками или антипиренами.

*Антисептики* – это водостойкие и водоотталкивающие составы, защищающие древесину от поражений грибом и насекомыми. Антисептические препараты делают древесину непригодной для жизнедеятельности этих биологических разрушителей, уничтожают их, предотвращают их дальнейшее появление.

Все антисептики можно разделить на четыре группы:

- водорастворимые (на водной основе);
- маслянистые (на основе масел);
- на основе органических растворителей;
- комбинированные.

Основными представителями водорастворимых антисептиков являются фторид и кремнефторид натрия, смеси борной кислоты и буры, маслянистых – каменноугольное и сланцевое масла, на основе органических растворителей – растворы пентахлорфенола и нафтената меди в легких нефтепродуктах.

Вещества, увеличивающие огнестойкость древесины, называют *антипиренами*. Защитное действие антипиренов может быть обусловлено выделением при нагревании кристаллизационной воды в виде пара или других негорючих газов, которые оттесняют воздух от поверхности древесины и разбавляют горючие газы (сернистый и фосфорнокислый аммоний, квас-

цы). Много антипиренов (например, бура, борная кислота, силикат натрия, хлористый цинк) плавятся при нагревании и образуют защитную плотную пленку, покрывающую поверхность древесины и мешающую доступу кислорода. Такие антипирены как гидроксид калия, некоторые клеи, способствуют при высокой температуре созданию пенообразного теплоизоляционного слоя.

На практике применяют обычно смеси различных антипиренов. Пропитанная огнезащитными смесями древесина при действии пламени тлеет, но не горит. После удаления огня тление прекращается. Древесину от загорания могут защитить также разнообразные краски.

Отделочно-декоративные свойства древесины обуславливаются ее цветом, блеском и текстурой. Для улучшения цвета или придания желаемой окраски древесину подвергают протравливанию и окрашиванию. *Протравливание* заключается в обработке древесины некоторыми растворимыми неорганическими соединениями, химически взаимодействующими с дубильными веществами, в результате чего изменяется ее природный цвет.

Древесина некоторых пород имеет *блеск*, хорошо заметный на радиальных разрезах. Блеск обуславливается сердцевинными лучами, занимающими на радиальном разрезе значительную площадь. Блеск имеют клен, бук, платан, белая акация и др.

Древесине можно придать искусственный блеск полированием, лакированием или вощением. Хорошо полируется орех, ясень, несколько хуже – дуб, бук, клен, груша, еще хуже – мягкие лиственные породы; хвойные породы, за исключением тиса и ели, полируются плохо.

*Текстура древесины* зависит от ширины годовых слоев, различия в окраске ранней и поздней древесины, наличия сердцевинных лучей и больших сосудов, направления волокон. Древесину с красивой текстурой на радиальном разрезе имеют дуб, вяз, тисс, лиственница.

Обработка поверхности улучшает внешний вид изделий или защищает их от непосредственного влияния внешней среды. Улучшение внешнего вида изделий достигают различными видами художественной обработки древесины: резьбой, тиснением, выжиганием, облицовкой разнообразными декоративными материалами, напри-



мер, набором облицовочной фанеры (инкрустация), текстурной бумагой, полимерными материалами, тканями, фольгой и т.п..

Для обработки древесины используют грунтовки, замазки, шпаклевки, краски, эмали, политуры.

## 12.2. Лесо- и пиломатериалы. Изделия из древесины

**Лесо- и пиломатериалы.** К *лесоматериалам* относят материалы, получаемые путем механической обработки в основном ствола дерева. Ствол срубленного дерева, у которого отделены корни и сучья, в практике лесозаготовок называют *древесным хлыстом*. Хлысты и их обрезки в зависимости от размеров и наличия пороков относят к двум категориям: деловой и низкокачественной (дровяной) древесины. В строительстве находит применение преимущественно деловая древесина. Значительную часть низкокачественной древесины перерабатывают на лесоматериалы для технологических целей.

По способу механической обработки все лесоматериалы делят на шесть классов:

1. Круглые, получаемые поперечным делением хлыста на отрезки с сечением круглой формы;
2. Пиленые, получаемые продольным и последующим поперечным пилением древесины;
3. Лущеные, получаемые резанием древесины по спирали (лущением);
4. Строганные, получаемые резанием древесины ножами, формирующими плоскую поверхность раздела;
5. Колотые, получаемые разделением древесины вдоль волокон клиновидным инструментом;
6. Измельченные, получаемые специальной переработкой древесины с помощью рубильных машин, стружечных станков, размольных устройств и др.

Разновидности лесоматериалов определенного назначения первых пяти классов принято называть *сортиментами*.

Круглые лесоматериалы представляют собой отрезки стволов деревьев с обрубленными сучьями и опиленными торцами. Круглые деловые отрезки ствола от нижней комлевой части, которые могут служить для получения пиломатериалов, назы-

## 12. Материалы на основе древесины

---

вают *кряжами*. Отрезки стволов диаметром более 12 см считают *бревнами*, от 8 до 11 см – *подтоварником*, от 3 до 7 см – *жердями*.

Длина лесоматериалов зависит от их назначения и колеблется в широких пределах от 0,5 до 17 м. Наиболее распространены лесоматериалы с длиной 4-6,5 м.

В зависимости от толщины лесоматериалы разделяют на группы: 1 – от 6 до 13 см, 2 – свыше 14 до 24 см и 3 – от 26 и более.

Круглые лесоматериалы хвойных и лиственных пород (ГОСТ 9463-88, 9462-88) заготавливают трех сортов. Они предназначены для выработки пиломатериалов и заготовок общего назначения. Для выработки строганного и лущеного шпона, возведения опор линий связи и электропередачи применяют лесоматериалы первого и второго сортов. Лесоматериалы первого сорта предназначены для получения особо высококачественной продукции, например, заготовок авиационного назначения.

Основными сортоопределяющими пороками у хвойных лесоматериалов являются сучки, на втором месте находится гниль, далее – механические повреждения, которые являются технологическим браком. Для лиственных пород дополнительным сортоопределяющим пороком является кривизна, кроме того учитываются специфические пороки – побурение, ложное ядро и др.

При раскрое бревен получают пиломатериалы различного вида и размеров (рис. 12.12). Их применяют для получения заготовок строительных деталей или используют в целом виде. По форме и размерам поперечного сечения пиломатериалы делят на *доски* – для которых ширина вдвое больше толщины, *бруски* – ширина меньше двойной толщины и *брусья* – ширина и толщина более 100 мм. По числу пропиленных сторон брусья могут быть двух-, трех- и четырехкантными. По толщине пиломатериалы хвойных пород подразделяются на тонкие – до 32 мм включительно и толстые – 40 мм и более, по характеру обработки – на обрезные, опиленные с четырех сторон и необрезные, опиленные лишь с двух сторон. Пиломатериалы лиственных пород считают толстыми при толщине от 35 мм и более.

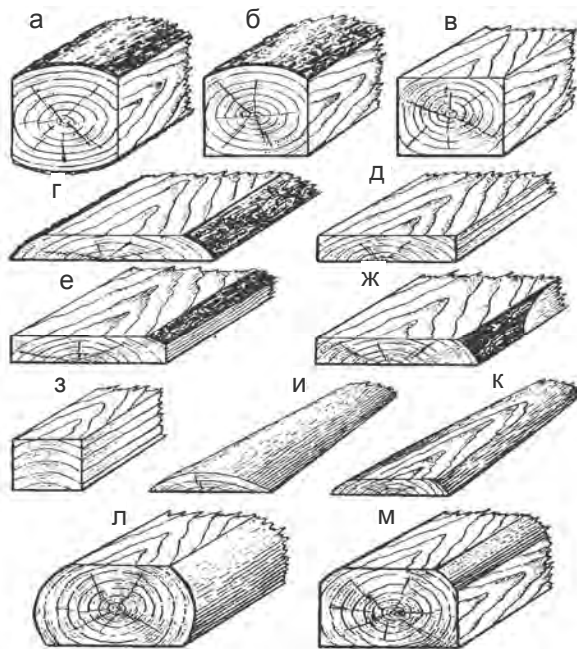


**Рис. 12.12.** Виды пилопродукции:

а – двухкантный брус; б – трехкантный брус; в – четырехкантный брус; г – необрезная доска; д – чистообрезная доска; е – обрезная доска с тупым обзолом; ж – обрезная доска с острым обзолом; з – брусок; и – обапол горбыльный; к – обапол дощатый; л – шпала необрезная; м – шпала обрезная

Доски и бруски разделяют по ГОСТ 8486-88 на пять сортов (отборный, 1, 2, 3, 4-й), а брусья на четыре сорта (1, 2, 3, 4-й). Для пиломатериалов из лиственных пород устанавливают три сорта. Пиломатериалы изготовляют сухими с влажностью не более 22%, сырыми (с влажностью более 22%) и сырыми антисептированными. Влажность пиломатериалов 4-го сорта не нормируется.

В зависимости от допустимой влажности пиломатериалы сохраняют в закрытых помещениях, под навесом или в штабелях. Для проветривания пиломатериалов в штабелях устраивают вертикальные колодцы, материалы в штабелях защищают также от атмосферных осадков.

**Заготовки и изделия из древесины.** *Заготовки* из древесины являются полуфабрикатами для изготовления деталей, применяемых в строительстве и других отраслях: вагоностроении, судостроении, производстве мебели и др. По видам обработки различают пиленые, калиброванные (простроганные) и клееные заготовки. Из хвойных пород изготавливают досковые заготовки – толщиной от 7 до 1000 мм и шириной более двойной толщины и брусковые заготовки – толщиной от 22 до 1000 мм и шириной не более двойной толщины. Длина заготовок может изменяться от 0,5 до 1 м с градацией 50 мм и свыше 1 м с градацией 100 мм. Номинальные размеры заготовок установлены для древесины со стандартной влажностью 12%. При большей влажности они должны иметь припуск на усушку.

По качеству древесины и обработки хвойные заготовки делят на четыре группы, лиственные – на три сорта.

К широко применяемым в строительстве относятся *профильные детали* (рис. 12.13) из древесины – доски и бруски для покрытия полов, подоконные доски, плинтусы, наличники, поручни и обшивки. Боковые поверхности профильных деталей – пласты или кромки – имеют заданный профиль (шпунт, гребень, паз, четверть и др.). Изготавливают их из цельной или клееной древесины фрезерованием боковых поверхностей. В последние годы развивается производство прессованных профильных деталей из древесной стружки, опилок и др.

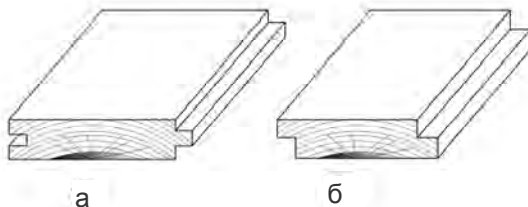


**Рис. 12.13.** Доски разного профиля для полов:  
а – шпунтованная, б – фальцованная

Для изготовления строганных погонажных деталей обычно используют древесину сосны, лиственницы, кедра, ели, пихты, а для помещений с относительной влажностью не более 70 % можно использовать древесину бука, березы, ольхи, тополя, липы. Не допускается изготавливать перила из древесины лиственницы, пихты, ели и

тополя, доски пола - из липы и тополя, а внешнюю обшивку - из древесины мягких лиственных пород и березы. Влажность древесины для наличников, плинтусов, раскладок перил и пола должна быть  $12 \pm 3\%$ .

К разновидностям профильных деревянных деталей можно отнести вагонку (рис. 12.14) – деревянную панель, используемую для отделки различных поверх-

ностей. Она классифицируется по породе дерева, сорту древесины, размерам и видам профиля.

В зависимости от качества древесины вагонку делят на четыре класса: «Экстра» (или 0), А, В, С – по виду профиля на обычную и евровагонку. Евровагонка от обычной отличается качеством обработки древесины, размерами и наличием на тыльной стороне вентиляционных канавок, служащих воздуховодами и способствующих отводу образующегося конденсата. Разновидностью евровагонки является вагонка «блок-хаус», имитирующая поверхность оцилиндрованного бревна. При облицовке вагонкой «блок-хаус» стены имитируют поверхности, характерные для рубленого до-

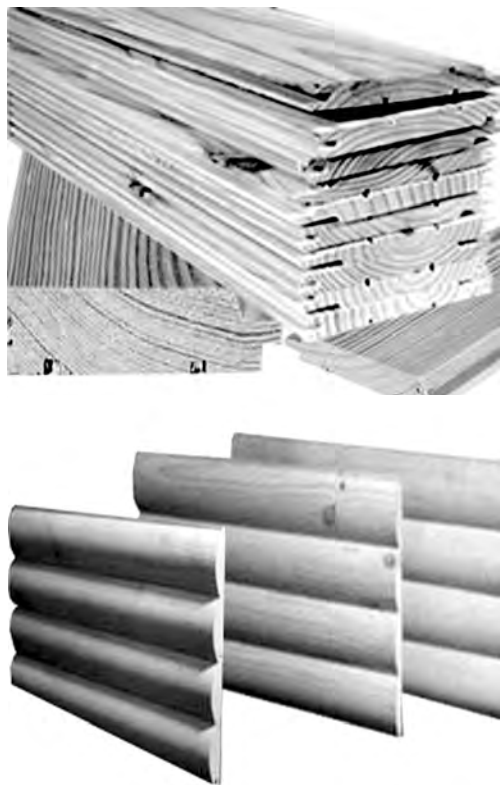


**Рис. 12.14.** Виды вагонки:  
а – вагонка обычная;  
б – вагонка "блок-хаус"

ма. Евровагонка может быть также имитирована «под брус».

Высококачественными изделиями для покрытий полов в помещениях жилых и общественных зданий являются *паркетные материалы*.

Они включают в себя сам *паркет* – материал, состоящий из деревянных пластин из твердых пород дерева, а также материалы, имитирующие паркет. В основном получил распространение паркет из дуба, бука, карагача, ясеня, клена, вяза, граба, березы. В последнее время на рынок поступил паркет из нетрадиционных материалов – прессованного бамбука и твердых пород латиноамериканских деревьев.

Пластины по боковым кромкам имеют гребни и пазы. Обычно гребень располагается на одной длинной и одной короткой кромке, а на двух других делаются пазы. Гораздо реже встречается паркет из двух видов пластин – на одних пластинах только пазы, а на других только гребни. Гребни и пазы обеспечивают плотное соединение отдельных пластин в единое целое.

*Паркет штучный* предназначен для устройства полов в жилых и общественных помещениях, а также вспомогательных зданиях промышленных и сельскохозяйственных предприятий.

Штучный паркет состоит из паркетных планок (рис. 12.15), которые в зависимости от профиля ребер делятся на типы  $\Pi_1$  – планки с гребнями и пазами на противоположных ребрах и торцах,  $\Pi_2$  – планки с гребнем на одном ребре и пазами на другом ребре и торцах.

В зависимости от уровня качества породы древесины и обработки планки подразделяют на марки А и Б.

Паркет марки А применяют для устройства и ремонта полов в общественных зданиях и соответствующих помещениях промышленных предприятий, марки Б – для устройства и ремонта полов в жилых домах.

*Доски паркетные* предназначены для устройства полов в жилых домах. Паркетная доска состоит из паркетных планок, наклеенных по определенному рисунку на основание (рис. 12.16). На ребрах и торцах есть пазы и гребни для соединения паркетных досок между собой.

В зависимости от породы и пороков древесины планок лицевого покрытия паркетные доски также как и штучный паркет подразделяют на марки А и Б.

Паркетные планки наклеивают на основание паркетной доски по различным узорам.

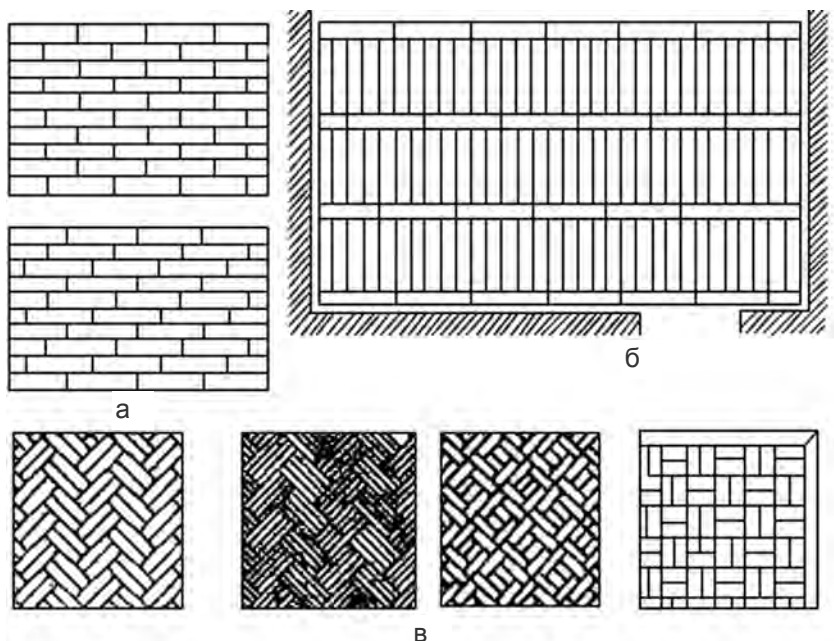


**Рис. 12.15.** Настиление штучного паркета рисунками:  
а – прямым; б – ковром; в – сложными рисунками

Влажность древесины паркетных досок при отгрузке потребителю –  $8 \pm 2\%$ .

*Паркетные щиты* предназначены для устройства полов в жилых и общественных зданиях.

Щит состоит из паркетных планок, квадратов шпона или фанерной облицовочной плиты, наклеенных по определенному рисунку на основание.

В зависимости от вида лицевого покрытия изготавливают щиты, облицованные паркетными планками (П), квадратами строганного или лущеного шпона (Ш) и квадратами фанерной облицовочной плиты (Ф).

Требования к паркетным щитам марки А соответствуют требованиям высшей категории качества. Щиты, облицованные квадратами фанерной облицовочной плиты, шпоном, а также планками из древесины сосны, изготавливают только марки Б.



**Рис. 12.16.**Трехслойная паркетная доска

*Мозаичный (художественный) паркет* (рис. 12.17) изготавливают в виде ковров, состоящих из отдельных планок, наклеенных лицевой поверхностью на бумагу или эластичный биостойкий материал. Мозаичный паркет, как и другие виды паркета, предназначен для устройства полов в жилых и общественных зданиях. Его изготавливают из наиболее ценных пород древесины – ореха, карельской березы, красного дерева, граба, клена. Пластины такого паркета имеют различную форму и за счет подбора цвета, фактуры древесины, а также вкраплений узких пластин различного цвета выкладывается художественный орнамент или рисунок.

Паркет в зависимости от способа фиксации планок для образования ковра разделяют на типы:

- П<sub>1</sub> – планки наклеенные лицевой стороной на бумагу, снимаемую вместе с клеевым слоем после настилки паркета на основание пола;

- П<sub>2</sub> – планки наклеенные обратной стороной на эластичный (теплозвукоизоляционный) биостойкий материал, остающийся в конструкции пола после настилки паркета.

Как эластичный материал используют битумизированные древесноволокнистые плиты, плиты из резиновой крошки и т.п.



В ребрах паркета типа П<sub>2</sub> могут быть устроены пазы для соединения ковров с помощью соединительных штаб из картона.

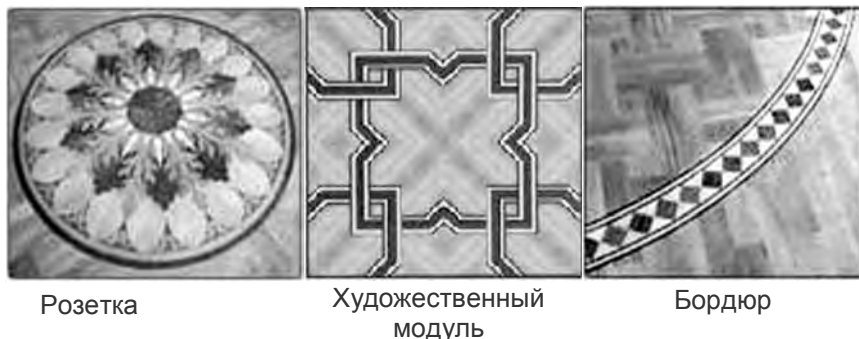


**Рис. 12.17.** Элементы мозаичного паркета

Основная форма ковра паркета – квадрат. Допускается изготовление паркета в форме прямоугольника. Паркетный ковер собирают из элементарных квадратов, обычно составляемых в шахматном порядке.

*Ламинат*, в отличие от природных материалов, изготавливают не из натуральной древесины, он включает печатный декоративный слой на полимерной основе, покрытый износостойкой пленкой.

Ламинат может имитировать мрамор, гранит, ковровые покрытия, кафельную плитку и др.

Большинство современных ламинатов имеет четырехслойную конструкцию (рис. 12.18). Ее основу составляет несущая древесно-волоконная плита высокой плотности. Это пластина толщиной 6-10 мм, обладающая плотностью 800-1100 кг/м<sup>3</sup> (в зависимости от величины ожидаемых нагрузок), высокой прочностью и влагоустойчивостью. Для получения рисунка на ламинате сначала фотографируется фрагмент древесины или другого материала, затем изображение переносится на бумагу, которая пропитывается меламиновой или акриловой смолой. Полученная таким образом декоративная бумага помещается над плитой и накрывается сверху оверлеем - прочной защитной пленкой из нетканого целлюлозного материала, которая также пропитана смолой. Для придания оверлею повышенной устойчивости к истиранию, на его поверхность напыляется оксид алюминия. Снизу под плиту подкладывается стабилизирующая подложка, компенсирующая напряжения, создаваемые

## 12. Материалы на основе древесины

двумя верхними слоями. Ламинат прессуется на прессах при высокой температуре ( $\sim 200^{\circ}\text{C}$ ) и под давлением 4 МПа. Изделия отправляются на склад, где они выдерживаются для снятия прессовых «шоков». После выдержки листы ламината разрезают на панели, размеры которых обычно находятся в диапазоне 190-300 мм (ширина), 1180-2000 мм (длина), и фрезеруют на торцах шипы и пазы, необходимые для соединения панелей. Ламинат укладывают в жилых помещениях, офисах, магазинах, музеях, отелях, спортивных залах и т.д. Ламинированные полы настилают «плавающим» способом, т.е. панели не крепятся к основанию, а соединяются между собой при помощи клея.



**Рис. 12.18.** Ламинат

Путем обработки деталей из древесины резанием с последующим соединением в сборочные единицы получают *столярные изделия*. Основными видами столярных изделий являются оконные и дверные блоки, подоконные доски, перегородки, доски пола и др. Оконные блоки состоят из оконной коробки и переплетов, в которые входят створки, фрамуги и форточки. Все элементы оконного блока являются деталями брускового типа. Дверные блоки могут быть филленчатой (рамочной) и щитовой конструкции. Филленчатые двери состоят из рамки, собранной из отдельных брусков и филе-

нок, закрывающих просветы между брусками. Филенки изготавливают из сухих досок, фанеры, древесностружечной или древесноволокнистой плиты. Щитовые двери представляют собой рамку, собранную из деревянных брусков и оклеенную с обеих сторон древесноволокнистой плитой или фанерой. Дверное полотно заполняется деревянными рейками, древесностружечной плитой, полосками фанеры, древесноволокнистой плитой, стружкой.

Столярные изделия изготавливают преимущественно из хвойных пород, из лиственных пород (бука, березы и др.) изготавливают изделия для помещений с относительной влажностью не более 70%.

### 12.3. Материалы из клееной древесины

*Клееная древесина* включает материалы, полученные прессованием с применением синтетических клеев. Она относится к наиболее эффективным строительным материалам. Клееная древесина может быть слоистой или полученной из шпона (например, фанера, древесно-слоистые пластики), массивной – из кусковых отходов лесопиления и деревообработки (панели, щиты, брусья, доски) и комбинированной (столярные плиты).

Клееные изделия из кусковых отходов древесины классифицируют по виду применяемого клея, характеру обработки поверхности и конструктивным особенностям. Прочность склеивания древесины зависит от пористости, соотношения ранней и поздней древесины в годовых слоях, ее влажности (рис. 12.19), химического состава, угла наклона волокон. Установлено, что прочность склеивания линейно связана с пористостью, она растет также по мере увеличения содержания целлюлозы.

Для склеивания по длине коротких досок и обрезков со стороны их склейки обрезают торцы, вырезают зубчатые шипы (рис. 12.19), затем торцы пропитывают клеем и стыкованные доски укладывают в пресс, где выдерживают до полного отверждения клея, в течение 6-18 ч. До механической обработки их выдерживают при нормальной температуре еще 6-12 ч. Кусковые отходы по толщине (ширине) склеивают в течение нескольких минут на полуавтоматических установках с прогревом клеевых соединений токами высокой частоты.

Преимуществами клееной древесины являются ее низкая средняя плотность, водостойкость, возможность получения из маломерного материала изделий сложной формы или крупных конструктивных элементов. В клееных конструкциях ослабляется влияние анизотропии древесины, они характеризуются повышенной гнилостойкостью и низкой возгораемостью, не подвержены усушке и короблению. Клееные деревянные конструкции (рис. 12.20) по срокам и трудозатратам при возведении зданий, а также стойкости при воздействии агрессивной воздушной среды часто успешно конкурируют со стальными и железобетонными конструкциями. Их применение эффективно при возведении сельскохозяйственных и промышленных предприятий, выставочных и торговых павильонов, спортивных комплексов, зданий и сооружений сборно-разборного типа.

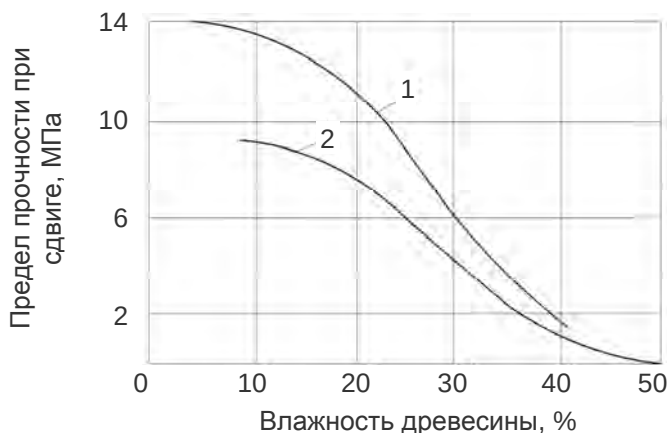


**Рис. 12.19.** Влияние влажности древесины на прочность склеивания ее фенолформальдегидным клеем: 1 – дуб; 2 – сосна

Клееные деревянные конструкции, как и железобетонные, можно выпускать предварительно напряженными, армируя их стальными стержнями. У армированных конструкций в виде сплошных или пустотелых балок несущая способность почти в 2 раза выше, чем у цельнодеревянных.

Номенклатура изделий из клееной древесины обширна. Так, из отрезков досок склеивают панели (рис. 12.21), имеющие предел прочности на скалывание вдоль волокон по клеевому шву не менее 6 МПа. Прочность на статический изгиб зубчато-шипового соеди-

нения составляет не менее 35 % прочности бездефектной древесины. Такие панели применяют для устройства перегородок, обшивки домов, настилов полов.

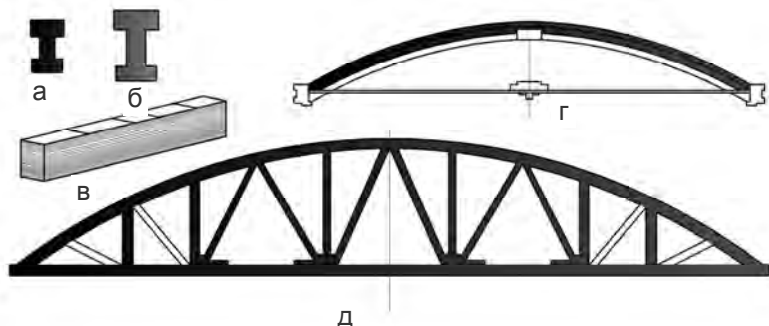


**Рис. 12.20.** Виды клееных изделий:

а, б – двутавровые балки; в – блок из досок; г – клееная арка из полуарок; д – клееная ферма

Из кусковых отходов лесопиления изготавливают *клееные щиты*, применяемые в основном для настила полов. Для их производства применяют кусковые отходы длиной 375 мм и больше. Их раскаивают на бруски, которые сушат до влажности 10-12 %, а затем склеивают при прессовании. Щиты строгают с двух сторон на рейсмусовом станке, обрезают по периметру до заданных размеров с одновременной выборкой на боковых кромках паза и гребня.

Из короткомерных и низкосортных пиломатериалов и отходов изготавливают плиты длиной 2500-5000 мм, шириной 1200 мм и толщиной 19 или 22 мм. Сырье раскаивают на заготовки длиной 2-2,5 м, которые обрезают по ширине, сортируют по длине и высушивают в сушильных камерах. Высушенные заготовки строгают, вырезают вскрывшиеся пороки древесины. Затем с помощью специальных шипорезных станков на них выбирают зубчатые шипы, на которые наносят клей. Заготовки собирают на сборочных станках и раскаивают на отрезки заданной длины. На одну из кромок заготовок наносят клей и набирают на цепном конвейере ковер плиты, который подается в высокочастотный пресс. Применение клееных плит позволяет на 20 % снизить себестоимость полов по сравнению с дощатыми за счет снижения стоимости материалов и трудозатрат.

Прессованием отходов лесопиления (тонких реек и брусков) с последующей обвязкой их оцинкованной проволокой получают *речные плиты*, применяемые в каркасных зданиях, для перекрытий и устройства временных производственных зданий.

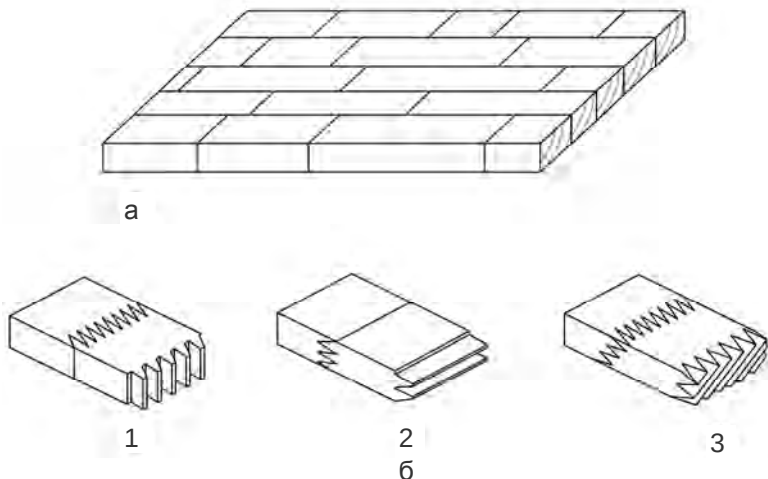


**Рис. 12.21.** Конструкция клееной панели:

а – общий вид; б – зубчатые клеевые соединения:

1 – вертикальное; 2 – горизонтальное; 3 – диагональное

При использовании клееных изделий в строительстве экономия деловой древесины составляет до 20 %, а стоимость конструкций уменьшается в 3-4 раза по сравнению со стоимостью конструкций из цельной древесины.

Конструкции из клееной древесины позволяют уменьшить массу зданий в 2,5-3 раза, снизить трудозатраты на 25-30%, сократить сроки строительства в 1,5-2 раза и уменьшить стоимость на 7-10%.

**Фанера.** *Фанера* – это листовый материал, склеенный из трех и более слоев лущеного шпона.

*Шпон* – облицовочный материал в виде тонких листов древесины, получаемый строганием брусьев (строганный) или лущением коротких пропаренных бревен из березы, ольхи, сосны и др. Лущеный шпон используется, кроме производства фанеры, также в производстве древеснослоистых пластиков и других видов слоистой

клееной древесины, для фанерования деталей и узлов столярных изделий. Строганный шпон применяют, в основном, в качестве облицовочного материала для изделий из древесины. Внешние слои шпона в фанере называются "рубашками", внутренние – "сердинками".

Фанеру изготавливают из древесины березы, ольхи, ясеня, дуба, липы, осины, тополя, клена, ели, сосны, пихты, кедра и лиственницы.

Фанера широко используется в строительстве как долговечный и легкий материал с высокими техническими свойствами. Ее применяют как материал опалубки, при изготовлении клееных деревянных конструкций – балок, рам, арок и др., устройства полов, как облицовочный материал.

Для отделки помещений применяют фанеру общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород, декоративную фанеру, фанеру бакелизованную и фанерные плиты.

Фанеру общего назначения по ГОСТ 3916.1-96 подразделяют в зависимости от внешнего вида поверхности на сорта, по степени водостойкости клеевого соединения на марки, по степени обработки поверхности на шлифованную и нешлифованную.

В зависимости от количества пороков древесины и дефектов обработки наружных слоев фанеру подразделяют на пять сортов: Е (элита), I, II, III, IV. Максимальное количество допускаемых пороков древесины и дефектов обработки на поверхности фанеры устанавливается в зависимости от сорта шпона наружных слоев. Шпон Е не должен иметь видимых пороков и дефектов обработки.

По степени водостойкости клеевого соединения фанеру подразделяют на марки: ФСФ - повышенной водостойкости, ФК - водостойкая. Фанера ФСФ изготавливается с применением фенольных смол и предназначена для внутреннего использования, ФК – карбамидных и может быть использована как внутри помещений, так и снаружи.

По степени механической обработки поверхности фанеру подразделяют на:

- нешлифованную - НШ;
- шлифованную с одной стороны - Ш1;
- шлифованную с двух сторон - Ш2.

## 12. Материалы на основе древесины

---

Размеры листов фанеры: длина (ширина) 1200-3660мм, толщина 3-30мм. Для фанеры нормируются влажность (5-10%), предел прочности при скалывании по клеевому слою после кипячения или вымачивания в воде (0,6-1,5МПа), при статическом изгибе вдоль волокон наружных слоев – 2,5-5,5МПа – для фанеры ФК и 3,0-6,0 МПа – для фанеры ФСФ. Предел прочности при растяжении вдоль волокон для фанеры ФК должен быть не менее 30, ФСФ – не менее 40 МПа.

*Декоративную фанеру (ДФ)* – изготавливают из березового, ольхового и липового шпона из трех и более листов и облицовывают пленочным покрытием в сочетании с декоративной бумагой или без нее.

Применяют декоративную фанеру для внутренней отделки стен, перегородок, дверных полотен и т.д.

*Бакелизованная фанера (ФБ)* изготавливается из березового лущеного шпона, пропитанного фенолформальдегидными *полимерами*. Для этого вида фанеры характерны повышенные плотность и прочность, гладкие поверхности.

*Фанерные плиты* – многослойные изделия, изготовленные из нескольких слоев шпона, склеенных синтетическими клеями на основе фенолформальдегидных и карбамидоформальдегидных смол.

Плиты изготавливают толщиной 12-78 мм с плотностью 550-850 кг/м<sup>3</sup> и пределом прочности при статическом изгибе вдоль волокон наружного слоя в зависимости от толщины и породы шпона от 5 до 10 МПа.

*Столярные плиты* – изделия, состоящие из реечных щитов, оклеенных с обеих сторон шпоном. Изготавливают нешлифованными и шлифованными, необлицованными и облицованными с одной или двух сторон. Плиты производят длиной 1525-2500 мм, шириной 1220-1525 мм, толщиной 16-30 мм и более. Предел прочности плит при статическом изгибе поперек реек в зависимости от толщины плит может изменяться от 10 до 25 МПа.

**Древесные пластики.** *Древесно-слоистые пластики (ДСП)* – материалы из листов шпона, измельченной древесины или опилок, пропитанных полимерами резольного типа и склеенных в процессе термической обработки под давлением.

Древесно-слоистые пластики используют как конструкционный материал, а также для облицовки внутренних помещений общест-



ДСП-А – волокна древесины во всех слоях имеют параллельное направление или каждые четыре слоя с параллельными направлениями чередуются одним слоем, имеющим направление волокон под углом 20-25° к смежным слоям;

ДСП-В – направление волокон во всех смежных слоях взаимно перпендикулярно;

ДСП-Г – направление волокон смежных слоев последовательно смещено на  $30-45^{\circ}$ .

Древесно-слоистые пластики изготавливают в виде листов толщиной менее 15 мм и плит толщиной от 15 до 60 мм двух типов: цельные, склеенные из цельных по длине листов шпона; составные, склеенные из нескольких листов шпона по длине, уложенные внахлестку или встык.

|                                         |                          |
|-----------------------------------------|--------------------------|
| плотность, кг/м <sup>3</sup> , не менее | 1230-1300                |
| предел прочности при сжатии             | 100-180 МПа              |
| при растяжении                          | 140-280 МПа              |
| при изгибе                              | 150-280 МПа              |
| при скалывании по шву                   | 11-15 МПа                |
| ударная вязкость                        | 25-80 кДж/м <sup>2</sup> |
| водопоглощение за 24 ч, %, не более:    |                          |
| для плит толщиной 25-50 мм              | 2-3                      |
| для листов                              | 5-15                     |
| влажность, %, не более:                 |                          |
| для плит                                | 6-10                     |
| для листов                              | 3-8                      |

К древесным пластикам относятся также лигнотуголеводные и пьезотермопластики. Эти материалы изготавливаются из древесных опилок или другого растительного сырья высокотемпературной обработкой пресс-массы без ввода специальных связующих.

## 12. Материалы на основе древесины

Технологический процесс производства *лигноуглеводных древесных пластиков* состоит из следующих операций: подготовки, сушки и дозирования древесных частиц; формирования ковра, холодной его подпрессовки, горячего прессования и охлаждения без снятия давления. При подготовке пресс-массы древесные частицы сортируют, затем фракция крупностью более 0,5 мм дополнительно измельчается, кондиционные опилки поступают в сушилку, а затем в расстилочную машину. Ковер формируется на поддонах, покрытых слоем талька или антиадгезионной жидкости. Сначала готовый ковер подается в пресс для холодной подпрессовки, которая длится в течение 1,5 мин при давлении 1-1,5 МПа, после чего направляется на горячее прессование при давлении 1,5-5 МПа и температуре 160...180°C. Прессование плит толщиной 10 мм продолжается 40 мин.

Под воздействием температуры происходят частичный гидролиз полисахаридов древесины и образование органических кислот, которые являются катализаторами, способствующими деструкции лигноуглеводного комплекса. Образовавшиеся химически активные продукты (лигнин и углеводы) взаимодействуют между собой при прессовании. В результате образуется более плотный и прочный материал, чем древесина.

Заключительной технологической операцией является обрезка кромок плит на форматно-обрезном станке.

Физико-механические показатели лигноуглеводных пластиков приведены в табл. 12.2.

Таблица 12.2

Технические параметры и свойства лигноуглеводных пластов

| Древесина   | Исходная влажность опилок, % | Давление при прессовании, МПа | Температура плит пресса, °C | Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> | Предел прочности на статический изгиб, МПа | Водопоглощение, % | Разбухание, % |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|---------------|
| Лиственница | 13                           | 5                             | 170                         | 1370                                 | 28,5                                       | 12,1              | 15,3          |
| Сосна       | 12,5                         | 2,5                           | 170                         | 1270                                 | 25...30                                    | 10...12           | 12,1          |
| Береза      | 18                           | 5                             | 160                         | 1340                                 | 26,5                                       | 6,8               | 16            |

Сырье для лигноуглеводного древесного пластика получают при обработке древесины хвойных и лиственных пород. Наряду с опилками, станочной стружкой, дробленкой, для получения пластика могут быть использованы кора в смеси с древесиной, дробленые лесосечные отходы и некоторые одревесневшие сельскохозяйственные отходы.

Лигноуглеводные пластики можно получать плоским или объемным прессованием в виде плит и изделий различной конфигурации в зависимости от применяемого прессового оборудования и назначения изделия.

По сравнению с древесностружечными плитами, лигноуглеводные пластики обладают рядом преимуществ: они не подвержены старению из-за деструкции органического вяжущего и их прочностные показатели не снижаются со временем; при эксплуатации нет токсичных выделений в окружающую среду.

Существенными недостатками производства лигноуглеводных пластиков являются необходимость мощного прессового оборудования и длительность цикла прессования.

*Пьезотермопластики* могут изготавливаться из опилок двумя способами: без предварительной обработки исходного сырья или его гидротермальной обработкой.

При первом способе производства пьезотермопластиков технология близка к получению лигноуглеводных пластиков (рис. 12.22). Высушенные опилки поступают на подпрессовку, где выдерживаются в течение 20-30 с при удельном давлении 2-2,5 МПа, а потом в многостажном гидравлическом прессе в течение 4-7 мин подвергаются горячему прессованию при давлении 20-30 МПа и температуре плит пресса 140-225°C.

По второму способу кондиционные опилки размером менее 4 мм обрабатываются в автоклавах паром в течение 2 ч при температуре 170-180°C и давлении 0,8-1 МПа. Гидролизованная пресс-масса частично высушивается и при определенной влажности последовательно подвергается холодному и горячему прессованию. Удельное давление холодного и горячего прессования – 15 МПа, температура последнего – 160°C.

Исходным сырьем, наряду с опилками, могут служить измельченная древесина хвойных и лиственных пород, льняная и конопляная костра, камыш, гидролизный лигнин, одубина.

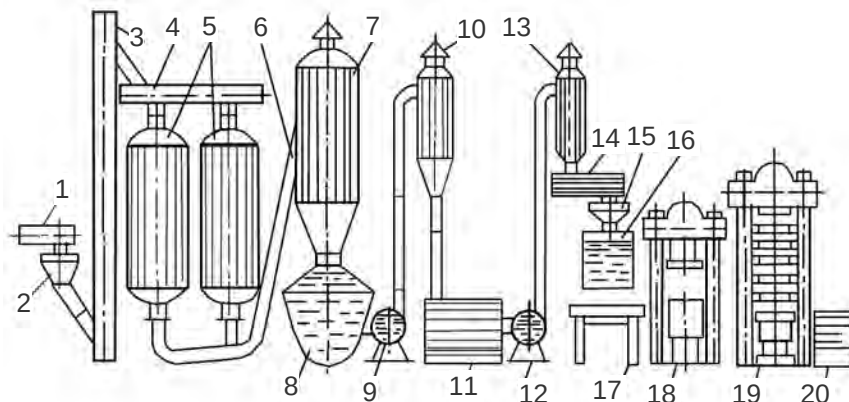


**Рис. 12.22.** Схема технологического процесса производства плиток пола пьезотермическим способом с предварительным гидролизом опилок: 1 – вибросито; 2, 15 – бункеры; 3 – элеватор; 4, 14 – шнеки; 5 – автоклавы; 6 – труба; 7, 10, 13 – циклоны; 8 – приемник пресс-массы; 9, 12 – пневмотранспортные установки; 11 – сушилка; 16 – смеситель; 17 – стол для приготовления брикетов; 18 – пресс холодного прессования; 19 – пресс горячего прессования; 20 – готовые изделия

Пьезотермопластики подразделяют на изоляционные, полутвердые, твердые и сверхтвердые.

При средней плотности  $700-1100 \text{ кг/м}^3$  пьезотермические пластики, изготовленные из березовых опилок, имеют предел прочности при статическом изгибе 8-11 МПа. При повышении средней плотности до  $1350-1430 \text{ кг/м}^3$  предел прочности при статическом изгибе достигает 25-40 МПа.

Высокие физико-механические свойства пьезотермопластиков позволяют применять их для полов, дверей, а также в качестве отделочного материала.

### 12.4. Материалы на основе измельченной древесины

**Материалы с применением полимерных вяжущих.** В эту группу материалов входят прессованные изделия на основе древесной стружки, волокнистой массы и опилок, смешанных с полимерными вяжущими. Близкими к ним являются материалы с использо-

ванием волокнистых отходов растительного происхождения (костры, стеблей хлопчатника и др.).

*Древесностружечные плиты* – это материал, полученный горячим прессованием измельченной древесины, смешанной со связующими веществами – синтетическими полимерами. Преимуществами этого материала являются однородность его физико-механических свойств, небольшие линейные изменения при переменной влажности, возможность высокой механизации и автоматизации производства.

Промышленность выпускает плоские и экструзионные плиты. Во-первых частицы расположены параллельно, во-вторых – перпендикулярно к плоскости плиты, что достигается прессованием методом экструзии (выдавливания). При применении фенолформальдегидных и меламиноформальдегидных как связующих смол с добавками гидрофобных веществ получают плиты повышенной водостойкости, мочевино-формальдегидных (карбамидных) – средней водостойкости. Древесно-стружечные плиты разнообразны по конструкции (однослойные сплошные и с внутренними каналами, трехслойные и многослойные), плотности (легкие:  $\rho_0 < 500$ , средние  $\rho_0 = 500-650$  и тяжелые  $\rho_0 = 660-700$  кг/м<sup>3</sup>), виду отделки (необлицованные и облицованные бумагой, лущеным или строганым шпоном).

В соответствии с ГОСТ 10632-90 плиты подразделяют:

- по физико-механическим показателям - на марки П-А и П-Б;
- по качеству поверхности - на I и II сорта;
- по виду поверхности – с обычной и мелкоструктурной (М) поверхностью;
- по степени обработки поверхности – на шлифованные (Ш) и нешлифованные;
- по гидрофобным свойствам – с обычной и повышенной (В) водостойкостью;
- по содержанию формальдегида - на классы эмиссии Е1 и Е2.

Плиты изготавливают длиной 1830-5680 мм, шириной 1220-2500 мм и толщиной от 8 до 28 мм.

Физико-механические показатели плит плотностью от 550 кг/м<sup>3</sup> до 820 кг/м<sup>3</sup> должны соответствовать нормам, приведенным в табл. 12.3.

## Физико-механические свойства древесностружечных плит

| Наименование показателя                                                                           | Норма для плит марок |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------|
|                                                                                                   | П-А                  | П-Б  |
| Влажность, % $T_H^*$                                                                              | 5                    | 5    |
| $T_B^*$                                                                                           | 12                   | 12   |
| Разбухание по толщине:<br>за 24 ч (размер образцов 100×100 мм), %, ( $T_B$ )                      | 22                   | 33   |
| за 2 ч (размер образцов 25×25 мм), % ( $T_B$ )**                                                  | 12                   | 15   |
| Предел прочности при изгибе, МПа, для толщин, мм ( $T_H$ ):                                       |                      |      |
| от 8 до 12                                                                                        | 18                   | 16   |
| от 13 до 19                                                                                       | 16                   | 14   |
| от 20 до 30                                                                                       | 14                   | 12   |
| Предел прочности при растяжении перпендикулярно поверхности плиты, МПа, для толщин, мм ( $T_H$ ): |                      |      |
| от 8 до 12                                                                                        | 0,35                 | 0,30 |
| от 13 до 19                                                                                       | 0,30                 | 0,30 |
| от 20 до 30                                                                                       | 0,25                 | 0,25 |
| Покоробленность, мм ( $T_B$ )                                                                     | 1,2                  | 1,6  |

\*  $T_H$  и  $T_B$  – соответственно нижний и верхний пределы показателей.

\*\* Для плит повышенной водостойкости.

Класс эмиссии плит  $E_1$  соответствует содержанию формальдегида до 10 мг на 100 г абсолютно сухой плиты,  $E_2$  – свыше 10 до 30 мг.

Основным видом сырья для изготовления древесностружечных плит служит неделовая древесина, к которой относятся отходы лесопиления и деревообработки, а также отходы лубяных растений – солома, тростник, коistra.

Технологический процесс производства плит (рис. 12.23) состоит из следующих процессов: сортировки, окоривания, увлажнения, раскроя древесины на заготовки, переработки ее в специальную

стружку, сушки и проклеивания стружек связующим, формирования стружечного ковра, прессования и дополнительной обработки.

К специальной резаной стружке, получаемой на стружечных станках, возможно добавление стружки - отхода деревообработки, а при изготовлении экструзионных плит – опилок. Для устройства внутренних слоев без снижения качества плит может быть использована также одубина.

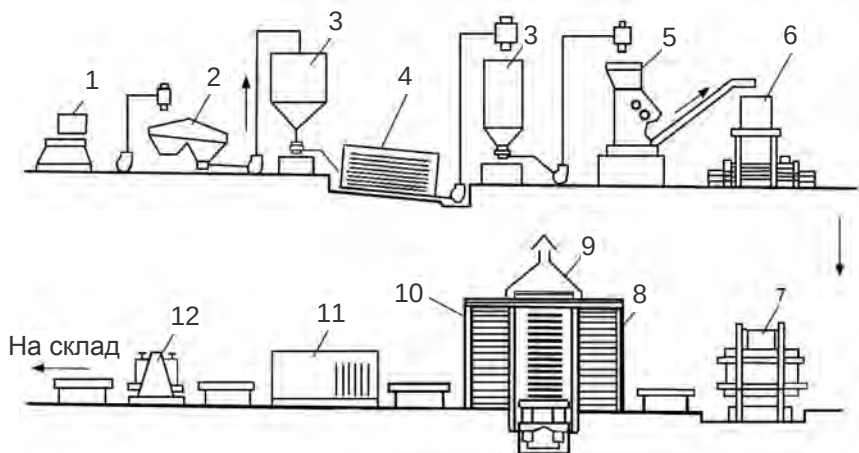


**Рис. 12.23.** Схема производства однослойных древесностружечных плит: 1– рубильная машина; 2 – вибрационное сито; 3 – бункер; 4 – сушила; 6 – настилочная машина; 7 – "холодный" пресс; 8 – загрузочный; 9 – пресс горячего прессования; 10 – разгрузочный; 11 – камера для выдержки плит; 12 – станок для обрезки плит

Расход вяжущего зависит от типа плит, назначения слоя и породы древесины. Применение лиственных пород увеличивает расход вяжущего на 10-20 %. Для устройства наружного слоя 3-слойных плит расход полимера составляет 12-14, а внутреннего – 8-10 %. У однослойных плит вяжущее по массе составляет 10-12, а у экструзионных – 5-8 %. Специальные свойства плит регулируются введением добавок в стружечную массу: для повышения биостойкости вводят антисептики, огнестойкости – антипирены, водостойкости – гидрофобизаторы.

При производстве плит плоского прессования применяют два способа проклеивания стружки. При первом способе вначале из соответствующих компонентов готовят жидкий клей, который при помощи форсунок наносят на стружку. По второму способу компоненты клея наносят раздельно. Для экструзионных плит применяют лишь первый способ приготовления связующего.

Проклеивание стружки производится в специальных смесителях, из которых она ленточными конвейерами передается в формующую машину, где образуется стружечный ковер, подвергаемый холодной подпрессовке, а затем прессованию в горячем прессе.

Для прессования плит применяют гидравлические многостажные прессы. Плиты пресса нагревают до температуры 150 °С и выше. В первый период прессования давление достигает максимальной величины – 3 МПа, а затем, после некоторой выдержки, оно снижается до 0,6-0,8 и 0,3-0,4 МПа.

Для обрезки кромок плиту направляют на форматный станок, а затем на штабелеукладчик. При экструзионном прессовании плита формуется в виде бесконечной полосы, которую разрезают на изделия определенных размеров.

Область применения древесно-стружечных плит весьма разнообразна. Как конструктивно-отделочный материал их применяют при устройстве полов, потолков, стен, перегородок, дверей, встроенной мебели и т. д.

*Ориентировано-стружечные плиты (ОСП)* – плиты, включающие ориентированную плоскую стружку, получаемые при термической переработки древесины путём прессования при высоком давлении и температуре, с использованием фенолальдегидных полимеров (рис. 12.24).

Плиты ОСП представляют собой, как правило, трехслойный материал, выполненный из «древесной шерсти» – удлиненной (6-9 см) щепы древесины хвойных пород. Главная особенность плит ОСП – различная ориентация щепы. В верхнем и нижнем слоях щепы располагаются вдоль длины всей плиты, а в среднем слое – перпендикулярно покрывающим слоям. Такая структура плит обеспечивает высокую механическую прочность, она выше, чем у фанеры или древесно-стружечных плит в 3 раза. При этом сохраняется достаточная гибкость.

Различают три основных вида плит ОСП:



- ОСП-1 – плиты, предназначенные для использования в условиях пониженной влажности (мебель, обшивка, упаковка);
- ОСП-2 – плиты, используемые при изготовлении несущих конструкций в сухих помещениях;



**Рис. 12.24.** Ориентированно-стружечная плита (ОСП)

- ОСП-3 – плиты, выдерживающие тяжелые режимы эксплуатации (несущие конструкции в условиях повышенной влажности).

По степени механической обработки плиты изготавливают шлифованные и нешлифованные. Выпускают также лакированные, ламинированные и шпунтованные плиты.

Цвет плит варьируется от светло-желтого

до коричневого в зависимости от породы древесины, рецептуры связующего и режима прессования.

Повышенная прочность плит ОСП позволяет хорошо удерживать шурупы и гвозди, они характеризуются стабильностью формы, не подвержены короблению, имеют повышенную водостойкость (разбухание при нахождении в воде в течение 24 часов составляет 17-25%, при этом материал не разрушается и практически сохраняет прочность). Плиты легко обрабатываются (режутся, строгаются, шлифуются), для них характерны хорошие звукоизоляционные свойства.

Плотность плит изменяется в зависимости от вида используемой древесины и технологического процесса изготовления. Она, как правило, находится в пределах  $600-680 \text{ кг/м}^3$ . Основные размеры плит:  $2500 \times 1250 \text{ мм}$ ,  $2440 \times 1220 \text{ мм}$ ,  $3660 \times 1220 \text{ мм}$  при толщинах 6, 8, 12, 15, 18, 22, 25, 38 мм.

Наиболее распространенной областью применения плит ОСП является использование их в качестве материала для изготовления

## 12. Материалы на основе древесины

---

панелей каркасных домов, обшивки стен, полов и кровли. Плиты применяют также для перекрытий, несущих балок и др.

*Древесноволокнистые плиты* – листовой материал, изготовленный путем горячего прессования или сушки ковра из древесных волокон с введением при необходимости связующих и специальных добавок.

Сырьем для изготовления плит служат отходы деревообрабатывающих производств и лесозаготовок (древесина, щепа), стебли камыша, льняная костра и прочие растительные материалы.

Плиты в зависимости от назначения подразделяют на типы: твердые, сверхтвердые, полутвердые и мягкие.

Твердые плиты в зависимости от прочности, плотности и вида лицевой поверхности подразделяют на марки:

- Т – плиты с необлагороженной лицевой поверхностью;
- Т-С – плиты с лицевым слоем из тонкодисперсной древесной массы;
- Т-П – плиты с подкрашенным лицевым слоем;
- Т-СП – плиты с подкрашенным лицевым слоем из тонкодисперсной древесной массы,
- Т-В – плиты с необлагороженной лицевой поверхностью и повышенной водостойкостью;
- Т-СВ – плиты с лицевым слоем из тонкодисперсной древесной массы и повышенной водостойкостью.

Изготавливают также сверхтвердые и полутвердые плиты марок:

- НТ – плиты пониженной плотности (полутвердые);
- СТ – плиты повышенной прочности (сверхтвердые) с необлагороженной лицевой поверхностью;
- СТ-С – плиты повышенной прочности (сверхтвердые) с лицевым слоем из тонкодисперсной древесной массы.

Твердые плиты марок Т, Т-С, Т-П, Т-СП в зависимости от уровня физико-механических показателей подразделяют на А и Б, по качеству поверхности – на I и II сорт.

Мягкие плиты в зависимости от плотности подразделяют на марки: М-1, М-2, М-3.

Основные размеры твердых плит: длина – 1220-3660 мм, ширина – 160-2140 мм, толщина – 2,5-6 мм; мягких плит: длина – 1220-3000 мм, ширина – 1220 мм, толщина – 8-16 мм.

Твердые плиты предназначены для отделки внутренних поверхностей зданий, из них изготавливают щитовые двери и другие элементы домостроения, мягкие – для утепления ограждающих конструкций и звукоизоляции перегородок.

Физико-механические свойства древесноволокнистых плит приведены в табл. 12.4.

Таблица 12.4

Физико-механические свойства древесноволокнистых плит

| Наименование показателя                                                    | Норма для плит |          |                |                |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------|----------|----------------|----------------|
|                                                                            | сверхтвердых   | твердых  | полутвердых    | мягких         |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                                               | 950-1100       | 950-1100 | <600           | 100-400        |
| Предел прочности при изгибе, МПа<br>не менее                               | 47             | 40       | 15             | 0,4-1,8        |
| Разбухание по толщине за 24 ч, %;<br>не более                              | 13             | 10       | 30             | Не нормируется |
| Влажность, %;<br>не менее                                                  | 3              | 4        | 3              | Не нормируется |
| не более                                                                   | 10             |          | 12             |                |
| Водопоглощение за 2 ч, %;                                                  | Не нормируется |          | 34             |                |
| Водопоглощение лицевой поверхности за 24 ч:<br>не более                    | 7              | 7        | Не нормируется |                |
| Предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти, МПа:<br>не менее | 0,32           | 0,30     | Не нормируется |                |

Древесноволокнистые плиты легко поддаются механической обработке, им можно придавать текстуру древесины, кожи и т. п.

Отделочные плиты облицовывают синтетическими полимерами с прокладкой текстурной бумагой. Выпускают их также с матовой

## 12. Материалы на основе древесины

---

поверхностью или окрашенными вододисперсионными поливинилацетатными красками. Плиты, окрашенные эмалями, имеют глянцевую поверхность, повышенную водостойкость.

Древесноволокнистые плиты выпускаются с гладкой лицевой поверхностью или рустованными. Русты делают в виде параллельных полос на расстоянии 150 и 100 мм друг от друга или в виде квадратов 150×150 и 100×100 мм.

Недостатками древесноволокнистых плит являются повышенное водопоглощение и гигроскопичность, особенно при увеличении пористости, легкая воспламеняемость и поражаемость грибами. Для уменьшения гигроскопичности плит и связанных с нею разбухания, коробления и загнивания волокнистую массу обрабатывают эмульсиями гидрофобизирующих веществ, например канифолью, парафином или церезином. Эмульгаторами служат олеиновая кислота, синтетические жирные кислоты, талловое масло, ЛСТ и другие ПАВ.

Биостойкость плит возрастает при добавке в исходную массу антисептиков неорганического или органического происхождения (фторида натрия, хлорида цинка, фенола, крезол и др.). Огнестойкость древесноволокнистых плит увеличивают пропиткой антипиренами (бурой, сульфатом или фосфатом аммония и др.). Для повышения температуростойкости в состав волокнистой массы добавляют минеральные вещества (асбест, гипс и др.).

Древесноволокнистые плиты изготавливают мокрым и сухим способами.

При мокром способе древесина после разделки и получения волокна загружается в бассейны, где она перемешивается с водой до образования гидромассы, имеющей после сгущения концентрацию 2,5-3 %. Для улучшения свойств изделий гидромасса обрабатывается эмульсиями химических веществ. При получении сверхтвердых плит в массу для повышения механической прочности, термостойкости и водостойкости вводится до 5 % термореактивных полимеров. После проклейки химикатами масса разбавляется водой до концентрации около 1 % и направляется в отливочные машины, где вода фильтруется, а волокна образуют слой войлокообразного ковра, отжимаемого затем прессованием. Ковер разрезают на отдельные полотна, направляемые на сушку для получения мягких изоляционных плит или на горячее прессование для получения твердых и сверхтвердых плит. Основной недостаток мокрого способа – это

потребление большого количества воды для приготовления пульпы и необходимость очистки отработанной воды от токсичных веществ.

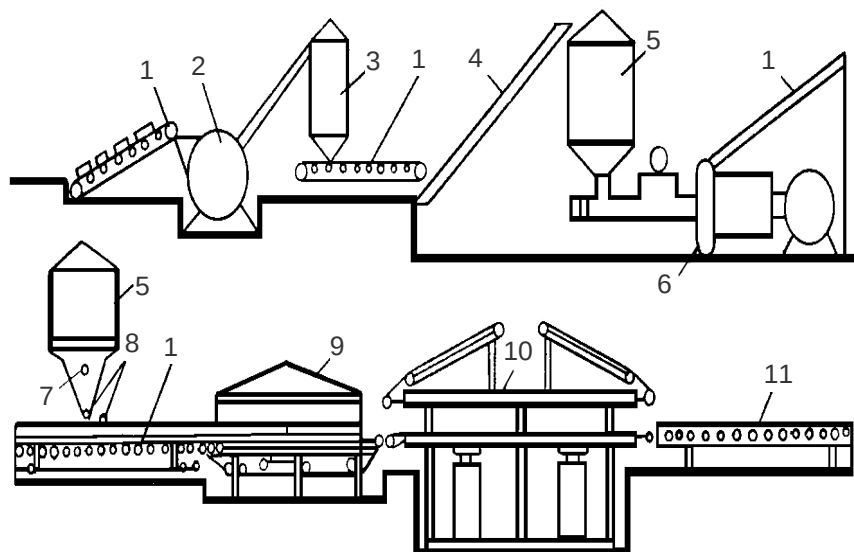


**Рис. 12.25.** Схема производства древесношерстных плит:

- 1 — конвейер; 2 — рубильная машина; 3 — циклон; 4 — элеватор;  
5 — бункер; 6 — дозатор; 7 — ковроукладчик; 8 — дозирующие валики;  
9 — гидротермоподпрессовщик; 10 — пресс гидравлический;  
11 — рольганг

При сухом способе волокнистая масса после размолва высушивается горячим воздухом, а затем из нее в воздушной среде формируется ковер. Полотна с влажностью 5-8% поступают на горячее прессование. При сухом способе производства плит расход воды составляет всего 5-6 м<sup>3</sup> на 1т плит. Кроме того, сбрасываемая вода не содержит токсичных веществ и отпадает необходимость в очистных сооружениях. К недостаткам этого способа относится необходимость присадки связующего в объеме 0,5-2% массы древесных частиц.

Твердые и сверхтвердые плиты, изготавливаемые мокрым способом, имеют одну сторону гладкую, а другую — шероховатую, со следами углублений в виде сетки. Плиты, изготовленные сухим

## 12. Материалы на основе древесины

способом, имеют гладкие стороны, обладают большей формоустойчивостью, менее подвержены короблению, их легче проклеивать.

Являясь так же, как и древесно-стружечные плиты, эффективным индустриальным материалом, древесноволокнистые плиты вместе с тем требуют при их производстве более значительного расхода электроэнергии и технологического пара.

К древесноволокнистым плитам сухого формования близки по своим свойствам *древесношерстные плиты*, изготавливаемые из измельченных кусковых отходов лиственных и хвойных пород по полусухой технологии контактным способом (рис. 12.25). Отходы измельчают на рубильной машине в щепу, а затем перерабатывают на дефибраторе в древесную шерсть. Древесная масса влажностью 30-40% подвергается гидротермальной обработке, а затем – горячему прессованию.

Разновидностями древесноволокнистых плит являются *плиты МДФ* и *НДФ*, изготавливаемые из мелкодисперсной древесноволокнистой массы методом сухого горячего прессования. В качестве связующего в плитах служит лигнин, выделяемый при нагревании. Плиты МДФ и НДФ имеют высокие физико-механические свойства, легко поддаются механической обработке, влагостойки, не разбухают от воды и не коробятся от пара, устойчивы к грибкам и микроорганизмам. Их применяют для изготовления декоративных мебельных фасадов, стеновых панелей, профилей, производства дверей и наличников. Толщина плит 8-38 мм, размеры 1830-2070×2440-2800 мм. Плотность плит 800-950 кг/м<sup>3</sup>, разбухание по толщине 9-20%, прочность при изгибе 20-37 МПа, прочность на разрыв 0,8-1,2 МПа.

С использованием древесных и других волокнистых отходов возможно производство разнообразных *местных строительных материалов*.

В строительстве особенно сельском, имеется положительный опыт производства таких материалов, как древесноопилочные плиты, ортенкс, риплит и другие.

Материалы из опилок с полимерными вяжущими предназначены для изготовления плит, панелей, щитовых дверей, оконных коробок и др.

*Древесноопилочные плиты* изготавливают из смеси опилок, полимера, гидрофобизатора и антисептика. Они могут быть одно- и мно-

гослойными, сплошными и ячеистыми. Средняя плотность сплошных древесноопилочных плит составляет  $800 \text{ кг/м}^3$ , а ячеистых – 500, предел прочности достигает 20 МПа. Водопоглощение таких плит за 24 ч – около 10%, линейное разбухание по толщине – 12, длине и ширине – 0,5%. Толщина древесно-опилочных плит должна быть не меньше 19-24 мм. Плиты применяют для полов и отделки. Отделочные древесно-опилочные плиты имеют, с одной стороны ячеистую поверхность, с другой – гладкую.

К числу местных теплоизоляционных материалов относится *костроэмульбит*, получаемый на основе заполнителя – костры льна и вяжущего – битумной эмульсии. Эмульгатором битумной эмульсии и одновременно огнезащитным компонентом служит технический лигносульфонат (ЛСТ). Костроэмульбит предназначен для теплоизоляции кровель по несгораемым основаниям, а также как средний слой стеновых панелей в зданиях сельскохозяйственного назначения.

Технология получения *ортенкса* включает смешивание органического заполнителя со связующим, которое вводят распылением, с последующей укладкой проклеенной массы в форму и прессованием при просасывании через изделие горячего воздуха. Весь процесс формования и тепловой обработки изделий продолжается 20-25 мин. Плотность плит из ортенкса составляет  $175\text{-}300 \text{ кг/м}^3$ , прочность при изгибе – 0,5 МПа, теплопроводность –  $0,21\text{-}0,24 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ .

Для получения *королитовых плит* в качестве заполнителей применяют измельченную кору деревьев хвойных и лиственных пород. Роль органического вяжущего могут выполнять не только термореактивные полимеры, но и концентраты лигносульфонатов (ЛСТ). При применении органических вяжущих в массу дополнительно к добавкам гидрофобизаторов вводят антипирен в виде насыщенного водного раствора сульфата аммония.

Расход полимерного вяжущего составляет у королитовых плит около 12% их массы. Средняя плотность королита –  $450\text{-}800 \text{ кг/м}^3$ , предел прочности на сжатие – 0,5-3,5 МПа. Недостаток этого материала его высокое водопоглощение, достигающее через 24 ч, в зависимости от плотности, 70-115 %. Основное назначение королита – это теплоизоляция ограждающих конструкций.

## 12. Материалы на основе древесины

*Риплит* – теплоизоляционный материал на основе рисовой соломы и вспененного полимерного связующего: Он не горит, не подвергается воздействию плесени и микроорганизмов. Риплит получают четырех марок по плотности: 75, 100, 150 и 200 с пределом прочности при сжатии 0,05-0,18 МПа, при изгибе – 0,08-0,6 МПа, водопоглощением за 24 ч 13-20% (по объему) и теплопроводностью 0,14-0,19 Вт/(м°C).

Из порошкообразных или гранулированных *термопластичных древесно-полимерных композиций* методами непрерывного или периодического прессования можно изготавливать эффективные строительные изделия: плинтусы, наличники, раскладки, штапики, рейки со шпунтом и гребнем для покрытия полов, профилированные доски типа вагонки для обшивки стен малоэтажных строений, рейки для обшивки входных дверей, плитки и панели для облицовки стен, кровельные плитки и др. Строительные изделия из древесно-полимерных композиций могут успешно использоваться как в малоэтажном, так и в многоэтажном жилищном и гражданском строительстве.

**Древесно-цементные материалы.** Древесина содержит водорастворимые экстрактивные вещества, различные сахара, дубильные и смолянистые вещества, отрицательно влияющие на процессы твердения портландцемента. Степень пригодности основных пород древесины для изготовления материалов с применением портландцемента приведена в табл. 12.5.

Таблица 12.5

Пригодность некоторых пород древесины  
для композиции "древесина-цемент"

| Порода<br>древесины | Содержание<br>водорастворимых<br>веществ, % | Степень<br>пригодности<br>древесины |
|---------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|
| Ель                 | 1,12                                        | 1                                   |
| Тополь              | 1,29-1,45                                   | 2                                   |
| Береза              | 2,67                                        | 3                                   |
| Сосна               | 3,16-6,2                                    | 4                                   |
| Дуб                 | 2,55-7,33                                   | 5                                   |
| Ясень               | 2,24-5,81                                   | 6                                   |
| Лиственница         | 10,6                                        | 7                                   |



К числу лучших вяжущих для строительных изделий на заполнителях растительного происхождения относятся магнезиальные вяжущие (каустический магнезит и каустический доломит), затворяемые водными растворами хлористого магния и некоторых других солей. Производство этих вяжущих, однако, весьма ограничено, в основном, в связи с дефицитом солевых затворителей.

Главными представителями группы материалов на древесных заполнителях и минеральных вяжущих являются арболит, фибролит и опилкобетоны.

*Арболит* – это легкий бетон на заполнителях растительного происхождения, предварительно обработанных раствором минерализатора. Он применяется в промышленном, гражданском и сельскохозяйственном строительстве в виде панелей и блоков для возведения стен и перегородок, плит перекрытий и покрытий зданий, теплоизоляционных и звукоизоляционных плит. Арболитовые конструкции эксплуатируют при относительной влажности воздуха помещений не более 60%, при большей влажности необходимо устройство пароизоляционного слоя.

Не допускаются систематические воздействия на арболит агрессивных сред и температур свыше  $50^{\circ}\text{C}$  и ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Наружная поверхность конструкций из арболита, соприкасающаяся с атмосферной влагой, независимо от влажностного режима эксплуатации должна иметь отделочный (фактурный) слой.

В зависимости от средней плотности в высушенном до постоянной массы состоянии арболит подразделяется на теплоизоляционный (со средней плотностью до  $500 \text{ кг/м}^3$ ) и конструкционный ( $500\text{--}850 \text{ кг/м}^3$ ).

Теплопроводность арболита зависит от средней плотности и вида заполнителя. Для арболита на измельченной древесине со средней плотностью  $400\text{--}850 \text{ кг/м}^3$  теплопроводность составляет  $0,08\text{--}0,17 \text{ Вт/(м}^{\circ}\text{C)}$ , на измельченных стеблях хлопчатника и рисовой соломы, костре льна и конопли –  $0,07\text{--}0,12 \text{ Вт/(м}^{\circ}\text{C)}$ .

Прочность арболита прежде всего определяется качеством древесного заполнителя. Кроме того, на прочность оказывают влияние плотность, расход цемента, В/Ц, применяемые добавки, однородность структуры.

Сравнительно невысокие прочностные характеристики арболита объясняются химической активностью заполнителя и его подвер-

## 12. Материалы на основе древесины

женностью значительным влажностным объемным деформациям. Химическую активность заполнителя предопределяет количество сахаров, содержащихся в экстрактивных веществах.

Предел прочности арболита зависит от его влажности, особенно в диапазоне от 0 до 25%. Максимальную прочность этот материал приобретает при влажности 16-17%. Деформация при кратковременной нагрузке (показатель сжимаемости) у арболита примерно в 8-10 раз больше, чем у легких бетонов на минеральных пористых заполнителях.

Арболит имеет достаточно большое водопоглощение, однако преимуществом этого материала является легкая отдача поглощенной воды, т. е. быстрое высыхание. Морозостойкость арболитовых изделий назначается в зависимости от режима их эксплуатации и климатических условий района строительства; во всех случаях она принимается не менее F25.

Для изготовления арболита древесину для снижения количества вредных экстрактивных веществ определенное время выдерживают на складах (хвойные породы – не менее 2 мес., лиственные – 6 мес.). При положительной температуре выдержка сокращается до 1 мес при условии дальнейшего измельчения древесины в щепу. Дробленку хвойных и особенно лиственных пород обязательно замачивают в воде или в растворах минеральных солей. Последние, нейтрализуя действие вредных веществ в древесине, одновременно ускоряют твердение цемента.

Расход цемента, органического заполнителя и воды зависит от класса арболита по прочности на сжатие. Для теплоизоляционного арболита классов В0,35-В1 расход цемента М400 составляет 260-360 кг/м<sup>3</sup>, а конструкционно-теплоизоляционного классов В1,5 и В2,5 – 330-450 кг/м<sup>3</sup>.

Технология изготовления арболитных изделий (рис. 12.26) включает подготовку сырьевых материалов, приготовление арболитовой смеси и ее укладку в формы, твердение и сушку, отделку и складирование.

В отличие от производства искусственных минеральных пористых заполнителей требующего значительных затрат энергии, получение заполнителя для арболита сводится лишь к измельчению древесины до получения оптимального фракционного состава. В ряде случаев могут быть использованы станочная стружка и лесорамные опилки, которые требуют только рассева на фракции. Однако получение качественного арболита на этих заполнителях затруднено в связи с тем, что они имеют развитую удельную поверхность. Это приводит к увеличению выделе-

ния экстрактивных веществ в цементный раствор в процессе приготовления смеси и нормируемого количества цемента оказывается недостаточно для создания структуры высокой прочности. Лучшие результаты дает специально приготовленная дробленка из кусковых отходов древесины.



**Рис. 12.26.** Схема производства изделий из арболита на древесных отходах:

- 1 – приемная площадка; 2 – конвейер; 3 – рубильная машина; 4 – циклон; 5 – ленточный конвейер; 6 – молотковая дробилка; 7 – пневмоконвейер; 8 – циклон; 9 – промежуточный бункер; 10 – виброгрохот; 11 – бункер; 12 – ванна; 13 – растворосмеситель; 14 – дозаторы; 15 – арболитоукладчик; 16 – формовочные посты; 17 – бункер для заполнителя; 18 – дозатор для воды; 19 – раствороукладчик; 20 – кран; 21 – пост выдержки

Наряду с неармированными изделиями из арболита изготавливают изделия, армированные стальной арматурой.

При относительной влажности среды выше 60% арматуру располагают в защитном слое из бетона, который обеспечивает надежную пассивность стали. Рекомендуется также защищать стальную арматуру специальными покрытиями по аналогии с ячеистыми бетонами.

Арболитовые изделия производятся как обычные бетонные и железобетонные изделия по конвейерной, поточно-агрегатной и стандовой технологиям; смесь готовят в бетоносмесителях принудительного действия.

Основной технологической операцией при изготовлении арболитовых изделий является уплотнение смеси до требуемой средней плотности. Арболитовая смесь из-за свойственных ей упругих свойств не подчиняется общим закономерностям, присущим бетонным смесям на других видах заполнителей. При уплотнении смеси обычная вибрация малоэффективна, а прессование приводит к тому, что после снятия нагрузки происходят распрессовка смеси и нарушение уплотненной структуры. Эти особенности арболитовой смеси объясняются свойствами древесного заполнителя – легкого, упругого, пористого материала, энергично поглощающего влагу в процессе приготовления смеси, в результате чего смесь малоподвижна даже при больших расходах воды. Поэтому на практике приходится поддерживать высокие значения В/Ц, равные 1,1-1,3, а в случае получения теплоизоляционного арболита на базе костры – еще выше.

К механизированным способам уплотнения арболита относятся вибросиловой прокат, виброштампование, вибрирование с пригрузом. Завершающим этапом технологического процесса является тепловая обработка изделий до набора отпускной прочности. Пропаривание арболита по обычным для бетонов режимам приводит к потере прочности, что объясняется возникновением внутренних напряжений за счет объемных деформаций заполнителя, которые разрушают структуру твердеющего цементного камня; одновременно усиливается выделение сахаров в раствор, что способствует "отравлению" цемента. Лучшие результаты достигаются при низкотемпературной обработке по мягким режимам, аналогичным для древесины при ее сушке – температуре 50...60 °С и относительной влажности воздуха 70-80 %. При таком режиме арболит приобретает распалубочную прочность через 18-20 ч. Она не превышает 25-40% марочной, а влажность остается в пределах 30-35%. Для дальнейшего набора прочности и снижения влажности до отпускных величин изделия дополнительно выдерживают на закрытом складе в течение 7 дней при температуре 16-18°С.

При применении арболита снижается трудоемкость монтажа конструкций, а также возможно изготовление панелей полной заводской готовности размером "на комнату" с вмонтированными оконными и

дверными блоками, электропроводкой и т. д. Арболит имеет лучшие теплотехнические характеристики, чем керамзитобетон, что позволяет возводить стены меньшей толщины. В некоторых сооружениях замена традиционных материалов арболитом позволяет снизить массу здания в 1,3-1,5 раза. При эквивалентной толщине стены по условиям теплопередачи масса 1 м<sup>2</sup> ограждения из арболита в 7-8 раз ниже, чем из кирпича, и в 2-3 раза ниже, чем из керамзитобетона; стоимость 1 м<sup>2</sup> стены, соответственно, дешевле.

Применение арболита по сравнению с керамзитобетоном снижает расход цемента на 35-55 кг/м<sup>2</sup> ограждения при равном термическом сопротивлении.

Эффективность арболита проявляется в наибольшей мере в тех случаях, когда наряду с теплозащитными свойствами максимально используются также его прочностные свойства, например, в промышленных бескаркасных стеновых конструкциях, где он конкурентоспособен с современными легкими и ячеистыми бетонами.

*Фибролит* в качестве заполнителя и одновременно армирующего компонента включает древесную шерсть, которая представляет собой стружку длиной 200-500 мм, шириной 4-7 мм и толщиной 0,25-0,5 мм. Древесную шерсть получают из неделовой древесины хвойных, реже лиственных пород на специальных станках. В исходном сырье исключается присутствие гнили, косослоя и свилеватости, а также сучков диаметром более 30 мм, расположенных на расстоянии менее 200 мм друг от друга.

Фибролит выпускают в виде плит длиной 2400-3000 мм, шириной 500, 600 и 1200 мм и толщиной 30-100 мм. Для него установлены три марки по средней плотности: 300, 400 и 500. Влажность плит не должна превышать 20%.

Фибролит со средней плотностью до 400 кг/м<sup>3</sup> применяют для тепловой изоляции. Теплоизоляционный фибролит имеет теплопроводность 0,09-0,12 Вт/(м °С).

При средней плотности 400 кг/м<sup>3</sup> и более фибролитовые плиты, являясь теплоизоляционными материалами, одновременно могут использоваться и для возведения стен, перегородок и перекрытий. Теплопроводность конструктивно-теплоизоляционного фибролита 0,12-0,15 Вт/(м°С).

Фибролит отличается высокой звукопоглощаемостью, обусловленной сообщающимся характером пор, а также хорошими обрабатываем-

## 12. Материалы на основе древесины

мостью, гвоздимостью, сцеплением со штукатурным слоем и бетоном. Отрицательными свойствами фибролита являются значительная воздухопроницаемость, большое водопоглощение, низкая водостойкость, подверженность во влажном состоянии поражению грибом.

Технология производства фибролита включает следующие процессы: приготовление древесной шерсти; обработку ее минерализатором; смешивание с цементом обработанного сырья; прессование плит и их термическую обработку.

Для фибролита, наряду со средней плотностью, влажностью и теплопроводностью, нормируется предел прочности при изгибе, который в зависимости от плотности и средней толщины плит составляет 0,4-2 МПа.

Вместо цемента для фибролита (так же, как и арболита) могут применяться другие вяжущие, такие как строительный и высокопрочный гипс, белитошламовое вяжущее и др.

Перспективным материалом для деревянного домостроения являются *цементно-стружечные плиты*, изготавливаемые из специальных древесных стружек и портландцемента. Эти плиты прессуют при повышенном давлении.

Древесным сырьем для производства плит служит тонкомерная древесина хвойных и лиственных пород. Плиты выпускают двух марок: ЦСП-1 и ЦСП-2. Размеры плит, мм: по длине – 3200, 3600, по ширине – 1200 и 1250 и толщине – 8-40, физико-механические показатели приведены в табл. 12.6.

При плотности 1400-1200 кг/м<sup>3</sup> плиты ЦСП обладают высокой прочностью, атмосферостойкостью, не воспламеняются, не разрушаются термитами и дереворазрушающими грибами, хорошо склеиваются с древесиной, пластмассами и металлами, легко обрабатываются, отделываются красками. Их применяют в качестве наружной обшивки панелей жилых домов, для устройства полов, изготовления дверей, а также в качестве опалубки для бетона.

*Опилкобетоны* – это материалы на основе минеральных вяжущих и древесных опилок. К ним относятся ксилолит, ксилобетон и некоторые другие материалы, близкие по составу и технологии получения.

Опилкобетоны, содержащие кроме опилок минеральные заполнители, применяют в монолитном строительстве или для изготовления мелких стеновых блоков для наружных стен при возведении малоэтажных зданий, животноводческих и других сельскохозяйственных

сооружений. При изготовлении опилкобетонных смесей цемент сначала смешивают с песком, а затем с опилками, обработанными в растворе минерализатора, и водой. Для получения 1 м<sup>3</sup> опилкобетона классов В1-В2 средней плотностью 1050-1250 кг/м<sup>3</sup> расход портландцемента марки М400 составляет примерно 130 кг, гашеной извести – 105, песка – 600, опилок – 200 кг.

Таблица 12.6

Физико-механические показатели цементно-стружечных плит (ЦСП)

| Показатели                                                                   | Марка плит |       |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|-------|
|                                                                              | ЦСП-1      | ЦСП-2 |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                                                 | 1200       | 1400  |
| Предел прочности при изгибе, МПа, при толщине, мм:                           |            |       |
| 8-16                                                                         | 12         | 9     |
| 18-24                                                                        | 10         | 8     |
| 26-40                                                                        | 9          | 7     |
| Разбухание по толщине после 24 ч выдержки в воде, %, не более                | 2          | 2     |
| Водопоглощение за 24 ч, %, не более                                          | 16         | 16    |
| Влажность, %, не более                                                       | 9          | 9     |
| Твердость, МПа, не менее                                                     | 45         | 65    |
| Удельное сопротивление выдергиванию шурупов из пластин, Н/м                  | 4-7        | 4-7   |
| Морозостойкость (снижение прочности при изгибе после 50 циклов), %, не более | 10         | 10    |
| Теплопроводность, Вт/(°С м·к)                                                | 0,253      |       |
| Поглощение звука при толщине 18 мм, дБ                                       | 35         |       |

Опилкобетоны при средней плотности 300-700 кг/м<sup>3</sup> и прочности на сжатие 0,4-3 МПа применяют как теплоизоляционные материалы, а при средней плотности 700-1200 кг/м<sup>3</sup> и прочности на сжатие до 10 МПа – как конструкционно-теплоизоляционные.

Наибольшей прочности опилкобетоны достигают при твердении в теплых и влажных условиях.

### **13. БИТУМНЫЕ И ДЕГТЕВЫЕ ВЯЖУЩИЕ. МАТЕРИАЛЫ НА ИХ ОСНОВЕ**

В группу битумных и дегтевых вяжущих входят материалы коагуляционного твердения, состоящие преимущественно из высокомолекулярных углеводородов и их неметаллических производных. Часто применяемый для обозначения этой группы материалов термин – “органические вяжущие” является недостаточно конкретным, поскольку роль органических вяжущих могут выполнять также синтетические полимеры и некоторые другие вещества (декстрины, лигносульфонаты и др.). На основе битумных и дегтевых вяжущих получают многие гидроизоляционные, кровельные, дорожные, антикоррозионные, теплоизоляционные и другие материалы.

При большом разнообразии свойств их объединяет повышенная водо- и химическая стойкость, адгезионная способность, стойкость к разнообразным механическим воздействиям, термопластичность и др. Наибольшее применение битумные и дегтевые вяжущие находят в дорожном строительстве, где они позволяют получать высокотехнологичные покрытия, обладающие комплексом необходимых технико-эксплуатационных свойств. Основными представителями битумных и дегтевых вяжущих являются нефтяные битумы.

#### **13.1. Битумные вяжущие**

*Битумные вяжущие* вещества состоят из высокомолекулярных углеводородов нафтенового, метанового и ароматического рядов и их соединений с кислородом, серой, азотом. Элементарный химический состав всех видов битума достаточно близок: 70-85% углерода, 10-15% водорода, 5-10% кислорода, 1-5% серы, до 1% азота и незначительное количество некоторых металлов (V, Ni, Co, Fe, U) в виде сложных комплексов. Типичными для битумов являются функциональные группы: OH, -CH=CH-, COOR, COO, COOH. О качественном составе входящих в битумы углеводородов позволяет судить отношение C/H, для нафтеновых углеводородов оно выше чем у парафиновых, для ароматических выше чем у нафтеновых.

Различия в свойствах битумов, их физическом состоянии связаны с различным содержанием отдельных групп углеводородов: ма-



сел, смол, асфальтенов, карбенов, карбоидов, асфальтогенных кислот и их ангидридов, парафинов. Примерный групповой состав битума: масла – 40-60, смолы – 20-40, асфальтены – 10-25, карбены и карбоиды – 1-3, асфальтогенные кислоты и их ангидриды – 1%.

*Масла* состоят из углеводов с молекулярной массой 300-800. Они придают битумам текучесть, увеличивают испаряемость и снижают температуру размягчения.

*Смолы* состоят в основном из гетероциклических ароматических углеводов с молекулярной массой 600-1000. Эти соединения поверхностно-активные, они обладают хорошей адгезией к каменным материалам, образуя водостойкие пленки. Содержанием смол обусловлена пластичность и растяжимость битумов. Под влиянием окислителей и адсорбентов смолы уплотняются с образованием асфальтенов.

*Асфальтены* отличаются от смол значительно более высокой (в 2-3 раза) молекулярной массой. Для большинства битумов при нормальной температуре они представляют собой твердые тела. Содержание асфальтенов определяет температурную устойчивость, вязкость и твердость битумов.

*Карбены и карбоиды* по составу и свойствам близки к асфальтенам, но содержат больше углерода. Они встречаются преимущественно в крекинг-битумах.

*Асфальтеновые кислоты* и их ангидриды – наиболее полярные и активные компоненты битумных вяжущих. С увеличением их содержания улучшается адгезия вяжущих и в особенности – к карбонатным материалам.

*Парафины* – твердые метановые углеводороды, содержание которых зависит в битумах от состава исходной нефти. При содержании парафинов в битуме до 3,5% они не оказывают существенного влияния на его свойства, при большем содержании снижаются его растяжимость, температура перехода в жидкое состояние, повышается температура затвердевания.

Структуру битумов рассматривают с позиций мицеллярной и макромолекулярной теорий.

В соответствии с более ранней *мицеллярной* теорией основными структурными элементами битума считают коллоидные образования – мицеллы, включающие асфальтены, окруженные смолами. Мицеллы суспендированы в масляной среде. В зависимости от со-

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

---

держания отдельных компонентов битум образует различные дисперсные структуры (гель, золь, золь-гель) с определенными физико-механическими свойствами.

С позиций современной *макромолекулярной теории* битумы являются растворами смесей высокомолекулярных углеводородов и их производных. В зависимости от состава и внешних условий (температуры, давления) битумы могут находиться в различных структурно-морфологических состояниях, проходя последовательно все стадии от истинных и коллоидных растворов до пластичных и твердых тел. При температуре ниже температуры размягчения происходит развитие процессов ассоциации структурных единиц и формируется структура пластичного аморфного тела. При температуре ниже температуры хрупкости битумы представляют собой твердое тело, где наряду с аморфными веществами в стеклообразной нестабильной форме могут присутствовать кристаллические вещества, а также некоторое количество веществ (масел и низкоплавких смол), еще не потерявших пластичность. Указанные процессы изменения структурных состояний термодинамически обратимы и для каждого битума происходят в определенных температурных пределах. На физико-химические и реологические свойства битумов влияет не только соотношение основных групп углеводородов (масел, смол и асфальтенов), но и их строение, подвижность, наличие функциональных групп.

Для производства нефтяных битумов наилучшим сырьем являются тяжелые малопарафинистые нефти.

*Нефтяные битумы* получают как конечные продукты прямой перегонки или крекинга нефти. В зависимости от способа получения различают два основных вида нефтяного битума – остаточный и окисленный (рис. 13.1). *Остаточный битум* образуется как остаток после отгонки масел из мазутов и гудронов. Выход остаточного битума при перегонке нефти может достигать 15%. Остаточные битумы содержат асфальтены в небольшом количестве, поэтому имеют вязкую консистенцию и относятся к наиболее мягким сортам.

*Окисленный битум* получают путем окисления воздухом гудронов или остаточных битумов при температуре 180-280 °С (рис. 13.2). Под действием кислорода при такой температуре происходят сложные реакции конденсации, которые приводят к обогащению битума асфальтенами за счет уменьшения содержания масел и

смол. Увеличение части асфальтенов в окисленных битумах приводит к соответствующему изменению их физико-механических свойств – повышению температуры размягчения и вспышки, уменьшению пенетрации и растяжимости.

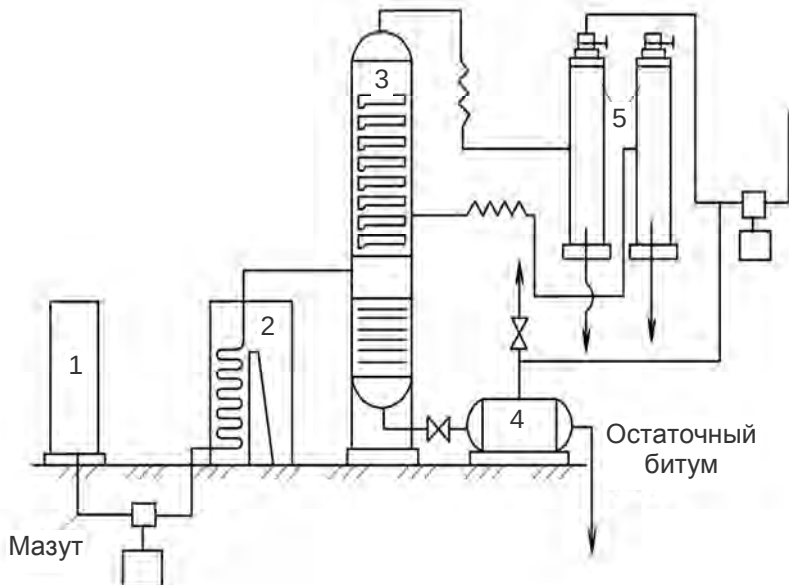


**Рис. 13.1.** Технологическая схема производства остаточного битума:

- 1 – мерный измеритель для сырья; 2 – трубчатая печь;
- 3 – вакуумная колонна; 4 – бак для готового продукта;
- 5 – конденсаторы

Для производства *крекинговых битумов* используют нефтепродукты, которые подвергаются действию высоких температур (до  $450^{\circ}\text{C}$ ) и давления (до 5 МПа). Сырье распадается на более легкие и устойчивые углеводороды и на продукты распада, образующие асфальтеносмолистые вещества. Остаточные крекинг-битумы получают путем перегонки под вакуумом крекинг-остатков, окисленные окислением тех же остатков в кубовых или трубчатых установках воздухом. Крекинг-битумы имеют невысокую погодоустойчивость и растяжимость.

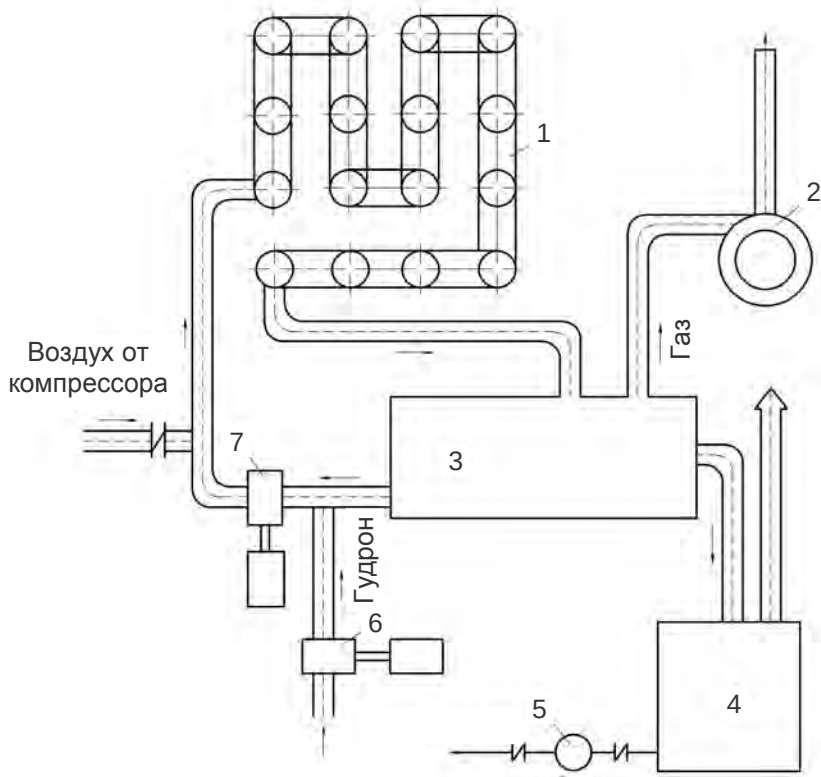


**Рис. 13.2.** Технологическая схема окисления битума на непрерывно действующей трубчатой установке:  
1 – реактор; 2 – циклонная печь для сжигания газа;  
3 – сепаратор; 4 – бак для готового продукта; 5, 6, 7 – насосы

*Природные битумы* наиболее часто пропитывают некоторые (асфальтовые) горные породы (известняки, доломиты, песчаники). Извлечение битума из асфальтовых пород целесообразно лишь, когда его содержание составляет не менее 10-15%. С этой целью применяют после измельчения породы вываривание битума с помощью горячей воды или экстракцией органическими растворителями. При меньшем содержании битумов в породах их перерабатывают в порошок и используют для получения асфальтовых мастик и бетонов.

Битумы – термопластичные материалы и их механические свойства изменяются в широких пределах при переходе от жидкого состояния к твердому. Под воздействием нагрузок в битумах возникают одновременно упругие и пластические деформации. В связи с тем, что развитие обратимых и необратимых деформаций подчиняется разным закономерностям, общая картина поведения битумов может быть весьма сложной.

Для описания поведения битумов под действием нагрузок И.М. Руденская и А.В. Руденский предложили уравнение:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\varphi} \tau^p, \quad (13.1)$$

где  $\varepsilon$  – деформация;  $\sigma$  – напряжение;  $\varphi$  – модуль сопротивления;  $\tau$  – время;  $p$  – показатель степени пластичности материала.

При  $p=0$  уравнение обращается в закон Гука для идеально упругих тел, при  $p=1$  – в закон Ньютона для идеальных жидкостей.

При низких температурах и коротких сроках загрузки все битумы ведут себя как упругие тела. Модуль деформации в этом случае идентичен модулю упругости и имеет для всех битумов значение около  $3 \cdot 10^3$  МПа. С увеличением температуры, длительности действия нагрузки и ее величины модуль деформации битумов существенно увеличивается.

Одним из важнейших строительно-технологических свойств битумов, от которого зависят условия приготовления и уплотнения асфальтовых бетонов и других материалов на его основе, а также поведение их в конструкциях является вязкость. Вязкость битумов в значительной степени определяется их составом и структурой, в первую очередь – содержанием асфальтенов и их средней молекулярной массой.

Вязкость растворов высокомолекулярных соединений к которым можно отнести и битумы, пропорциональна молекулярной массе растворенного соединения:

$$\eta = K\mu^a, \quad (13.2)$$

где  $\mu$  – молекулярная масса;  $a$  и  $K$  – константы, зависящие от свойств высокомолекулярного соединения. Влияние температуры на вязкость битумов в широком диапазоне показано на рис. 13.3.

При анализе изменения вязкости битумов необходимо учитывать не только температуру, но и уровень действующей нагрузки. Вяз-

кость битумов изменяется во времени в результате комплекса физико-химических процессов или “старения”. Старение битумов, проходящее под влиянием кислорода и температуры, сводится к образованию из коагуляционной структуры жесткой пространственной структуры асфальтенов с последующим ее разупрочнением и разрушением.

Вязкость твердых и вязких битумов характеризуется условным показателем – глубиной проникания стандартной иглы (*пенетрацией*) при действии на нее груза массой 100 г в течение 5 с при темпе-

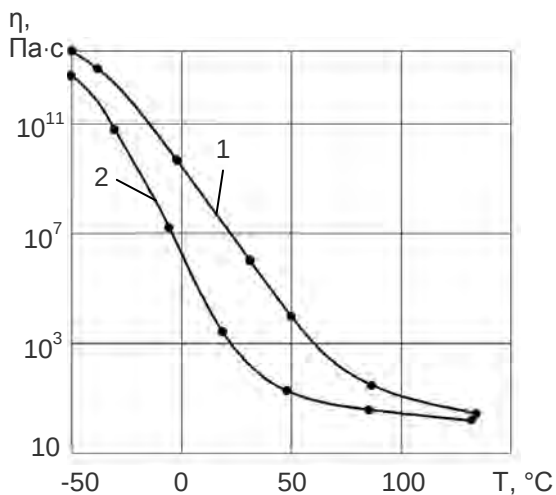


**Рис. 13.3.** Зависимость вязкости битума от температуры: 1 – битум БНД 60-90; 2 – битум БНД 130/200

ратуре 25°C и при 0°C (масса 200 г) в течение 60 с. Пенетрацию измеряют в градусах ( $1^0 = 0,1$  мм) на специальных приборах – пенетрометрах (рис. 13.4).

Вязкость жидких битумов определяют с помощью стандартного вискозиметра по времени истечения 50 мл вяжущего через калиброванное отверстие стандартного диаметра.

Для оценки прочностных свойств би-

тумов в условиях растяжения проводят испытание на растяжимость (*дуктильность*) при 25°C и скорости растяжения 50 мм/мин. Рекомендуется также определять растяжимость битумов при 0°C. Показателем растяжимости битума служит длина нити битума в момент разрыва, см. Испытания проводят на дуктилометре (рис. 13.5) при скорости деформации  $v = 8,3 \cdot 10^{-3}$  м/с (5 см/мин). Растяжимость битумов также как и вязкость зависит от состава, характера структуры и температуры. Высокие пластические свойства вязких битумов наблюдаются при значительном содержании смол, оптимальном со-

держании асфальтенов и незначительном содержании карбенов и карбоидов. С увеличением вязкости растяжимость битумов уменьшается.

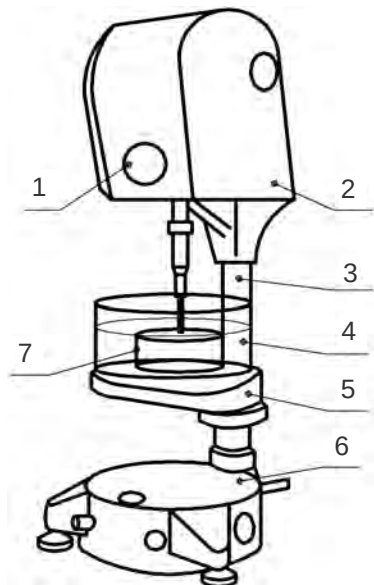


**Рис. 13.4.** Автоматический пенетрометр для определения глубины проникания иглы в битум:

1 – окуляр для наблюдения за отсчетами;

2 – автоматическое устройство для погружения иглы в битум; 3 – игла со стержнем; 4 – кристаллизатор с водой; 5 – установочный столик; 6 – подставка; 7 – чашечка с битумом

Переход битумов из жидкого в вязкопластическое, а затем в твердое состояние и обратно протекает в определенном интервале температур (например, для дорожного битума в интервале – 30...+60°C). Разность между температурой размягчения ( $T_p$ ) и температурой хрупкости ( $T_{xp}$ ) характеризует условный интервал пластичности битумов (ИП):

$$\text{ИП} = T_p - T_{xp}. \quad (13.3)$$

Температура размягчения, определяемая на приборе “Кольцо и шар” (рис. 13.6), соответствует вязкости битума равной примерно  $1 \cdot 10^3$  Па·с. Она возрастает при повышенном содержании асфальтенов и смол.

За температурой хрупкости принимают температуру, определяемую на приборе Фрааса в момент появления первой трещины на битуме при изгибании пластинки. Чем ниже температура хрупкости битумов, тем выше трещиностойкость материалов на их основе.

В технологии битумных материалов учитывают температуру вспышки битумов. Для вязких и твердых битумов она должна быть

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

не ниже 180-200, жидких среднегустеющих – 37-60 и медленно густеющих – 100-110°C.

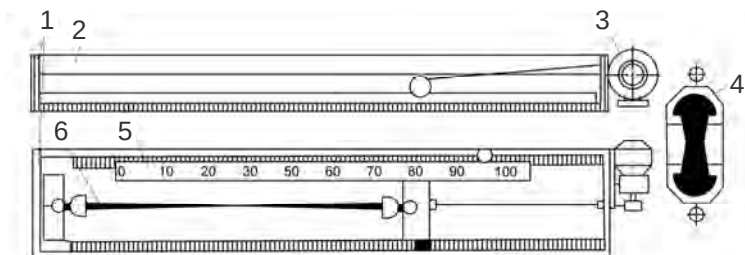


**Рис. 13.5.** Дуктилометр:

1 – сосуд; 2 – уровень воды; 3 – электродвигатель; 4 – вяжущее; 5 – линейка; 6 – нить вяжущего в момент разрыва

Пенетрация, растяжимость и температура размягчения - основные нормируемые свойства битумов, используемых в различных отраслях строительства.

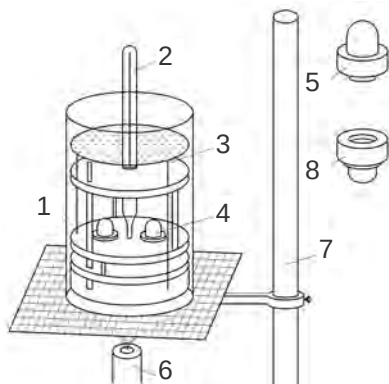


**Рис. 13.6.** Прибор «Кольцо и шар» для определения температуры размягчения битума:

1 – стеклянный сосуд; 2 – термометр; 3 – подставка стандартная; 4 – кольцо и шар; 5 – начальное положение шара до нагрева; 6 – газовая горелка; 7 – штатив; 8 – положение шара в момент нагрева

В зависимости от назначения различают дорожные, строительные, кровельные и изоляционные битумы, основные требования к которым приведены в табл. 13.1 и 31.2.

Для жидких битумов одним из важнейших свойств является скорость формирования их структуры в зависимости от которой их подразделяют на три класса: быстрогустеющие (БГ), густеющие со средней скоростью (СГ) и медленно густеющие (МГ).

Адгезионные свойства битума, влияющие на долговечность битумно-минеральных материалов, характеризуются его *активностью*, т.е. способностью к прочному сцеплению с по-



верхностью минеральных частиц. Активность битумов зависит от содержания в них поверхностно-активных соединений – асфальтовых кислот и их ангидридов. Недостаточная активность битумов в необходимых случаях компенсируется добавками поверхностно-активных веществ, которые разделяют на катионо- и анионоактивные. В катионоактивных ПАВ углеводородная часть молекул входит в состав катиона, в анионоактивных – в состав аниона. К первым относятся амины и их соли, четырехзамещенные аммониевые основания, ко вторым – органические кислоты и их производные. Катионоактивные ПАВ обеспечивают повышенное сцепление битумов со всеми горными породами, но особенно эффективны с кислыми, анионоактивные повышают сцепление с карбонатными породами.

Расход катионоактивных ПАВ составляет 0,5-2% от массы битума, анионоактивных – 3-5%. Значительное количество ПАВ входит в состав смол твердых видов топлив. Для улучшения адгезионной способности битумов к ним добавляют 7-12% смол твердых видов топлив. Некоторые ПАВ повышают стойкость битумов к старению.

Битумы – гидрофобные материалы, несмачиваемые и нерастворимые в воде, инертные к водным растворам минеральных солей и кислот, что позволяет их широко применять для гидроизоляционной и антикоррозионной защиты. Агрессивно влияют на эти материалы щелочные растворы (уже 10%-ный раствор щелочи вызывает омыление битума) и сильно концентрированные кислоты, обладающие окислительной способностью.

Битумы хорошо растворяются в органических растворителях особенно неполярного типа (дихлорэтано, уайт-спирте, хлороформе и др.).

Увеличение полярности битумов и улучшение адгезионных свойств достигается не только введением ПАВ, как указано выше. С этой целью возможна обработка битумов ультразвуком, приводящая к разрушению асфальтовых комплексов. При использовании битумов, обработанных ультразвуком, существенно, увеличивается прочность асфальтобетонов, на 20-30% возрастает их водоустойчивость.

Для пластификации битума, снижения его температуры хрупкости, расширения интервала пластичности применяют добавки пла-

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

стификаторы, в качестве которых используют жидкие фракции нефти или каменноугольной смолы, богатые ароматическими соединениями.

Таблица 13.1

#### Основные требования к нефтяным дорожным битумам (ГОСТ 22245-90)

| Наименование показателя                                        | Норма для битума марок |                 |               |              |              |               |               |              |             |
|----------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|-------------|
|                                                                | БНД<br>200/300         | Б11Д<br>130/200 | БНД<br>90/130 | БНД<br>60/90 | БНД<br>40/60 | БН<br>200/300 | БН<br>130/200 | БН<br>90/130 | БН<br>60/90 |
| Глубина проникания иглы, 0,1 мм:                               |                        |                 |               |              |              |               |               |              |             |
| при 25 °С                                                      | 201-300                | 131-200         | 91-130        | 61-90        | 40-60        | 201-300       | 131-200       | 91-130       | 60-90       |
| при 0 °С, не менее                                             | 45                     | 35              | 28            | 20           | 13           | 24            | 18            | 15           | 10          |
| Температура размягчения по кольцу и шару, °С, не ниже          | 35                     | 40              | 43            | 47           | 51           | 33            | 38            | 41           | 45          |
| Растяжимость, см, не менее                                     |                        |                 |               |              |              |               |               |              |             |
| при 25 °С                                                      | -                      | 70              | 65            | 55           | 45           | -             | 80            | 80           | 70          |
| при 0 °С                                                       | 20                     | 6,0             | 4,0           | 3,5          | -            | -             | -             | -            | -           |
| Температура хрупкости, °С, не выше                             | -20                    | -18             | -17           | -15          | -12          | -14           | -12           | -10          | -6          |
| Температура вспышки, °С, не ниже                               | 220                    | 220             | 230           | 230          | 230          | 220           | 230           | 240          | 240         |
| Изменение температуры размягчения после прогрева, °С, не более | 7                      | 6               | 5             | 5            | 5            | 8             | 7             | 6            | 6           |

Основные требования к строительным, кровельным и изоляционным битумам

| Марка би-<br>тума                           | Темпе-<br>ратура ра-<br>змяг-<br>чения,<br>°С,<br>не менее | Глубина про-<br>никновения<br>иглы,<br>0,1 мм при<br>температуре<br>25°С, не менее | Растяжи-<br>мость<br>при<br>темпера-<br>туре<br>25°С | Темпе-<br>ратура<br>вспыш-<br>ки,<br>°С,<br>не ниже |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Битумы нефтяные строительные (ГОСТ 6617-76) |                                                            |                                                                                    |                                                      |                                                     |
| БН 50/50                                    | 50                                                         | 41-60                                                                              | 40                                                   | 230                                                 |
| БН 70/30                                    | 70                                                         | 21-40                                                                              | 3,0                                                  | 240                                                 |
| БН 90/10                                    | 90                                                         | 5-20                                                                               | 1,0                                                  | 240                                                 |
| Битумы нефтяные кровельные (ГОСТ9548-74     |                                                            |                                                                                    |                                                      |                                                     |
| БНК 40/180                                  | 37-44                                                      | 160-210                                                                            | не нор-<br>мируется                                  | 60                                                  |
| БНК 45/190                                  | 40-50                                                      | 160-220                                                                            |                                                      | 60                                                  |
| БНК 90/130                                  | 85-95                                                      | 25-35                                                                              |                                                      | 70                                                  |
| Битумы нефтяные изоляционные (ГОСТ9812-74)  |                                                            |                                                                                    |                                                      |                                                     |
| БНИ – IV-3                                  | 65-75                                                      | 30-50                                                                              | 4,0                                                  | 250                                                 |
| БНИ – IV                                    | 75-85                                                      | 24-40                                                                              | 3,0                                                  | 250                                                 |
| БНИ – V                                     | 90-100                                                     | 20-40                                                                              | 2,0                                                  | 240                                                 |

Специальные добавки могут повышать или уменьшать вязкость битума. В первом случае применяют природные тугоплавкие битумы-асфальтиты, резиновую крошку, во втором разжижают битумы нефтью, продуктами углехимической промышленности.

Улучшение деформативных свойств битумов, расширение интервала их пластичности и улучшение адгезионных свойств обеспечивается также окислением нефтяного сырья в присутствии добавок окисленного петролатума, кубовых остатков производства синтетических жирных кислот и некоторых других веществ, содержащих тяжелые углеводороды. С этой же целью применяют добавки синтетических смол и каучуков в количестве 2-5% по массе.

Для предотвращения старения, сохранения прочности, эластичности, высокой адгезии битума в присутствии воды предложено обрабатывать битум SO<sub>3</sub>, нефтяными сульфонатами, карбоксилатами, AlCl<sub>3</sub>, гидрофобными ПАВ. Повышение стабильности окислен-

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

ных битумов к термо- и фотохимическому окислению обеспечивается введением в них 2-5% печной сажи. Устойчивость битумов к воздействию микроорганизмов обеспечивается введением добавки 1-3% перманганата калия, 3-5% сульфата и нафтената меди, солей или оксида цинка, пентахлорфенилового эфира и пр.

#### 13.2. Дегтевые и композиционные вяжущие. Эмульсии и пасты

**Дегтевые вяжущие.** К дегтевым вяжущим относят конденсированные продукты деструктивной (без доступа воздуха) перегонки твердых видов топлива. Наибольшее распространение из дегтевых вяжущих получили продукты термического разложения каменных углей. В процессах разложения каменных углей при 800-900°C без доступа воздуха (коксование, газификация) наряду с коксом, коксовым газом, бензолом, аммиаком и другими химическими продуктами получают смолы (“сырые дегти”). Выход кокса составляет 70-77%, газа 15-25%, бензола и аммиака до 2%, смолы около 10%. Каменноугольные смолы подвергают фракционной разгонке, выделяя легкие, средние, тяжелые и антраценовые масла, получая в остатке *пек*. Пек выпускают трех марок с температурой размягчения: А – 65-75°C, Б – 76-83°C, В – 135-150°C.

Дорожные дегти получают двумя способами: непосредственно при дистилляции каменноугольной смолы (*остаточный деготь* или мягкий пек) и смешением высококипящих фракций каменноугольной смолы и среднетемпературного пека (*составленный деготь*). Большее распространение получил второй способ.

Состав и структура дегтевых вяжущих более сложны, чем битумов. В состав каменноугольных смол входят ароматические углеводороды, гетероциклические соединения, их производные. К основным группам веществ, содержащихся в каменноугольных смолах и дегтях можно отнести: частицы угля, кокса, наиболее богатые углеродом высокомолекулярные соединения, “свободный углерод”, твердые смолы (типа асфальтенов в битумах); пластичные смолы; масла, фенолы, нафталин, антрацен. В смолах содержится до 15% воды. Содержание нафталина, снижающего вяжущие свойства смол в дорожных дегтях, не должно превышать 4-7%, фенолов, растворимых в воде, токсичных соединений – 3-5%.

Каменноугольные дегти, так же как и нефтяные битумы можно считать растворами высокомолекулярных соединений. Компоненты дегтя образуют сложную дисперсную систему, средой в которой являются масла, а дисперсной фазой – свободный углерод и твердые смолы.

Каменноугольные дорожные дегти разделяют на марки в зависимости в основном от вязкости. Вязкость дегтей определяется стандартным вискозиметром по времени истечения пробы 50 мл через отверстия диаметром 5 или 10 мм при температурах 30 и 50°C. Для получения составленного дегтя заданной вязкости смешивают разжижитель (масло) и пек в необходимой пропорции, обеспечивающей требуемую для данной марки вязкость.

Для дегтей характерна сравнительно низкая пластичность, обусловленная небольшим содержанием в них вязкопластичных компонентов и наличием свободного углерода. Интервал пластичности каменноугольных дегтей составляет в среднем 40°C, тогда как нефтяных битумов на 15-25°C выше.

Теплоустойчивость дегтей меньше чем нефтяных битумов (рис. 13.7), что объясняется их более грубой дисперсностью и повышенной плавкостью смол. С увеличением содержания грубодисперсного свободного углерода теплоустойчивость дегтей повышается. Для дегтей характерна также и более низкая водостойкость, вследствие того, что они содержат в своем составе водорастворимые вещества – фенолы. Вместе с тем, содержание фенолов и некоторых других соединений, являющихся сильными антисептиками, придает дегтям выраженные антисептические свойства. Эта особенность дегтей широко используется в технологии гидроизоляционных материалов.

Дегтевые вяжущие обладают значительно более высокими адгезионными свойствами по сравнению с нефтяными битумами. Эта их положительная особенность объясняется содержанием большого количества веществ с полярными группами.

Старение дегтевых вяжущих происходит значительно интенсивнее, чем нефтяных битумов. Под действием солнечного света и тепла масла, входящие в них, испаряются в дорожном покрытии и частично полимеризуются. Вследствие наличия ненасыщенных связей высокомолекулярные соединения легко подвергаются воздействию кислорода воздуха и погодных факторов. Ряд токсичных веществ,

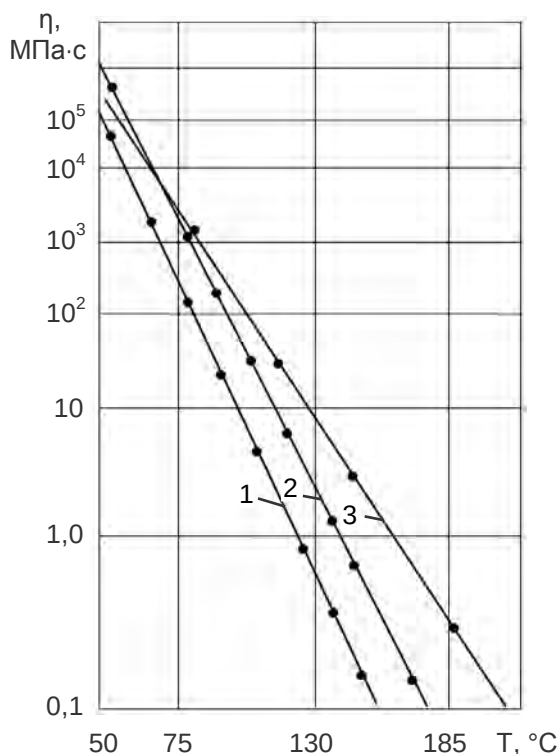


**Рис. 13.7.** Зависимость вязкости каменноугольного дегтя от температуры:

1 – каменноугольный деготь; 2 – каменноугольный деготь, модифицированный каменноугольной пылью; 3 – нефтяной битум

входящих в дегти, могут оказывать вредное влияние на человека, поэтому санитарными нормами запрещено их применение для устройства верхних слоев покрытий в городах и поселках, а также для устройства полов в промышленных и бытовых зданиях.

Улучшение свойств дегтевых вяжущих направлено, в основном, на повышение их вязкости и погодостойкости, расширение интервала пластичности. С этой целью их окисляют воздухом, повышают содержание веществ, нерастворимых в толуоле, введением среднетемпературного пека,

вводят также тонкодисперсные наполнители, смешивают с нефтяным, а также природным вязким битумом или асфальтитом, небольшими количествами синтетических полимеров и каучуков, добавляют серу.

**Композиционные вяжущие.** Характерные недостатки битумных и дегтевых вяжущих в значительной мере устраняются при их рациональном совмещении. Композиционные битумно-дегтевые вяжущие имеют повышенную биостойкость, атмосферостойкость, улучшенную клеящую способность и меньшую чувствительность к

температурным колебаниям. Наиболее распространены композиции, содержащие 67-70% битума и 25-30% дегтя. Возможные пределы содержания обоих компонентов при получении их гомогенной смеси расширяются при снижении количества свободного углерода в дегтях и пеках и незначительной концентрации парафинов в битумах.

Разновидностью дегтебитумных вяжущих является гудрокам. *Гудрокам* – продукт совместного окисления вязких битумов или гудрона с антраценовым или тяжелым каменноугольным (шпало-пропиточным) маслом в соотношении 1:1 при температуре 200...230°C. Гудрокам – твердый материал, его температура размягчения 75...130°C. В отличие от битума гудрокам обеспечивает биостойкость пропитываемых органических материалов и имеет ряд других улучшенных свойств.

В строительстве автомобильных дорог находят применение *сернобитумные* вяжущие. При температуре 130-140°C в битуме хорошо диспергируется до 20% серы. Сера плавится при 119°C и имеет более низкую вязкость чем битум. Так, в диапазоне 120-150°C вязкость серы составляет  $8 \cdot 10^{-3}$  Па·с, а битума (с пенетрацией при 25° равной 150-200) – 0,35 Па·с. Введение в битум серы способствует существенному увеличению его теплостойкости, повышению твердости. При обработке битума серой образуются полисульфидные соединения, которые переходят в циклические сульфиды с образованием межмолекулярных поперечных связей. При высоких температурах (выше 200°C) сера действует на битум аналогично кислороду, способствуя повышению содержания асфальтенов. При получении сернобитумных вяжущих необходимо учитывать возможность выделения токсичных газов при нагревании серы с битумом, а также горючесть серы.

Для повышения эластичности, температуры размягчения, прочности и долговечности битумов эффективными добавками являются резинокаучуковые вещества. Так, при соотношении резины и битума 1:1 относительное удлинение увеличивается больше чем в 2 раза, эластичность почти в 3 раза, сопротивление разрыву возрастает до 0,8 МПа, температура размягчения до 120°C, а температура хрупкости снижается до – 20°C. Этот существенный эффект в значительной мере объясняется образованием высокооднородной смеси и связыванием части масел в битумах резиной, что предотвращает их

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

---

испарение и быстрое старение материала. Содержание резины в *резинобитумных* вяжущих колеблется от 5 до 30%, причем оптимальная их концентрация увеличивается по мере снижения вязкости битума. Для изготовления резинобитумов применяют обычно измельченную резину из старых автомобильных покрышек, а также отходы производства. Получение резинобитумного вяжущего заключается в сплавлении измельченной резины с битумом при температуре 160-200°C и непрерывном перемешивании до полной гомогенизации. При механических воздействиях в среде расплавленного битума резина девулканизируется, приобретая высокую пластичность.

Оптимизация свойств битумных и дегтевых вяжущих достигается совмещением их с полимерными добавками. Полимерные добавки улучшают упругие свойства, растяжимость, когезию органических вяжущих. Наибольшее применение нашли эпоксидные смолы, поливинилацетат, полистирол, синтетические каучуки и латекс. Из отходов промышленности чаще других используют атактический полипропилен, полиэтилен, кубовые остатки ректификации стирола и др.

Все полимерные добавки к битумам и дегтям можно разделить на две категории. К первой можно отнести полимеры, макромолекулы которых характеризуются склонностью к ассоциированию, содержат функциональные группы и могут образовывать прочную пространственную сетку в результате взаимодействия этих групп с асфальтенами и возникновения химических связей. Ко второй группе относят полимеры, макромолекулы которых не проявляют склонности к ассоциированию и способны образовать сетку вследствие переплетения цепей.

Используемые для приготовления *полимербитумных* и *полимердегтевых композиций* натуральные и синтетические каучуки относятся, как правило, ко второй категории, термоэластопласты - к первой. Оптимальность молекулярной массы полимеров для приготовления композиционных вяжущих связана с совместимостью полимеров с битумом или дегтями, т.е. равномерностью и дисперсностью распределения полимера в массе вяжущих. Изучение добавок линейных и сетчатых полимеров показало, в частности, что битумы не совмещаются с ароматическими полимерами большой молекулярной массы.



**Эмульсии и пасты.** Битумы и дегти относятся к неполярным веществам и не растворяются в полярной жидкости – воде. Получение однородных водных дисперсий органических вяжущих в воде возможно при их эмульгировании с помощью водорастворимых поверхностно-активных веществ или минеральных тонкодисперсных порошков, нерастворимых в воде. В строительстве применяют преимущественно *битумные эмульсии*, которые в зависимости от вида ПАВ классифицируют на анионные (ЭБА) и катионные (ЭБК). По смешиваемости с минеральными материалами каждый вид эмульсии еще дополнительно разделяют на классы. Показатель смешиваемости косвенно характеризует склонность эмульсии к распаду.

В качестве анионоактивных эмульгаторов применяют анионовые мыла: щелочные соли нафтяных и смоляных кислот, лигносульфонаты и др. Катионоактивными эмульгаторами служат катионовые мыла: амины, полиамины, катапин и др. Содержание водорастворимых эмульгаторов в эмульсиях обычно не превышает 3%. Эмульсии с анионоактивными эмульгаторами относят к щелочным, с катионоактивными – к кислым.

В зависимости от особенностей исходных компонентов и состава получают прямые и обратные эмульсии. В первых капли битума диспергированы в воде, в других вода диспергирована в битуме. В основном применяют прямые эмульсии, получаемые в эмульсионных установках механического или акустического действия, куда подают битум и нагретый до 70-80°C водный раствор эмульгатора.

При перемешивании с каменными материалами в результате адсорбции эмульгаторов на их поверхности, поглощения и испарения воды происходит распад эмульсий. Скорость распада можно регулировать путем соответствующего корректирования pH эмульсий с помощью щелочей, солей или кислот. Устойчивые эмульсии с анионоактивными эмульгаторами имеют pH=7-11, катионоактивными – 3-6.

Наряду с добавками, повышающими устойчивость эмульсий возможно введение в их состав добавок, ускоряющих распад. В качестве таких добавок применяют соли кальция и магния, сернокислого железа, квасцы.

Битумные и дегтевые эмульсии применяют в качестве вяжущих для приготовления “черного щебня”, поверхностной обработки и

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

ремонта покрытий, укрепления откосов, ухода за твердеющим бетоном.

Наличие в составе эмульсий водорастворимых эмульгаторов несколько снижает водостойчивость гидроизоляционного покрытия при длительном действии воды, вызывая реэмульгирование битума. Этого недостатка лишены битумные эмульсионные *пасты* – разновидность эмульсий на основе твердых эмульгаторов. Эмульгаторами для паст служат пластичные глины, известь, цемент и другие высокодисперсные вещества. Активность эмульгатора определяется в первую очередь содержанием в нем коллоидных частиц мельче 0,005 мм. Она зависит также и от его минералогического состава. К наиболее активным относятся эмульгаторы на основе бентонитовых и каолиновых глин. Рекомендуемые соотношения компонентов в битумных пастах приведены в табл. 13.3.

Таблица 13.3

Рекомендуемые составы битумных эмульгированных паст  
на битуме БНД 40/60

| Эмульгатор                             | Содержание компонентов, % массы |       |             |
|----------------------------------------|---------------------------------|-------|-------------|
|                                        | битума                          | воды  | эмульгатора |
| Глина высокопластичная                 | 55-65                           | 25-37 | 8-10        |
| пластичная                             | 45-50                           | 31-45 | 10-14       |
| Суглинок тяжелый                       | 40-50                           | 30-45 | 15-20       |
| легкий пылеватый                       | 35-40                           | 25-30 | 30-35       |
| Известь гашеная 1 сорта                | 50-55                           | 33-42 | 8-12        |
| II сорта                               | 45-50                           | 34-43 | 12-16       |
| Трепел, лесс, диатомит                 | 50-55                           | 30-40 | 10-15       |
| Молотый асбест, кирпич, шамот, базальт | 30-35                           | 30-35 | 30-35       |

Высокодисперсные глинобитумные пасты устойчивы при хранении, в них битумные частицы не коагулируют даже после 10 лет

хранения. Дисперсность пасты принято характеризовать остатком на сите с ячейками 1 мм, который не должен быть более 5% для гидроизоляционных и более 10% для других паст.

Наиболее существенным свойством пасты является водоустойчивость в высушенном состоянии. Для гидроизоляционных работ рекомендуются пасты на известковом и асбестовом эмульгаторах, а также на комбинированных эмульгаторах из глины и извести.

Битумная паста готовится при нагреве исходных компонентов: битума – до 150°C, воды и теста эмульгатора – до 70°C, смешивание производят в специальных мешалках – пастосмесителях.

На основе битумных паст и минеральных наполнителей получают *холодные асфальтовые мастики*, которые применяют для гидроизоляции, антикоррозионной защиты бетона, кровельных работ, наклейки плиток, паркета и др.

### 13.3. Асфальтовые материалы

**Общая характеристика.** *Асфальтовыми* называют битумо-минеральные материалы: асфальтовые бетоны, мастики, черный щебень и др. По свойствам к асфальтовым близки дегтеминеральные материалы.

Структурообразование и формирование свойств асфальтовых материалов определяется не только свойствами органических вяжущих, но и их взаимодействием с минеральными компонентами. На границе раздела битум – минеральный материал происходят адсорбционные процессы. В результате формируются адсорбционные слои высокомолекулярных составляющих битума. Кроме того, битум попадая в зону межмолекулярных сил минерального материала, образует цепочки перпендикулярные к поверхности минеральных зерен. В ориентированном слое битума выделяют твердообразную зону, граничащую с поверхностью минерального материала и обогащенную асфальтенами и смолами, структурированную зону, состоящую из упорядоченно расположенных высокомолекулярных компонентов и диффузную зону, характеризующуюся слабым упорядочением и переходящую в объемный битум.

При полном переводе битума в асфальтовых материалах из объемного в ориентированное состояние достигается наибольшая

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

прочность системы, которая зависит от толщины битумного слоя на минеральных частицах (рис. 13.8). *Асфальтовое вяжущее*, представленное смесью битума и минерального порошка-наполнителя, в котором толщина битумной пленки менее 1 мкм, обладает значительно большей прочностью, чем асфальтовый раствор и тем более асфальтобетон.

При объединении битумов с карбонатными породами протекают хемосорбционные процессы с прохождением реакции между  $\text{CaCO}_3$  и асфальтогенными кислотами:



Образующиеся нерастворимые кальциевые мыла увеличивают

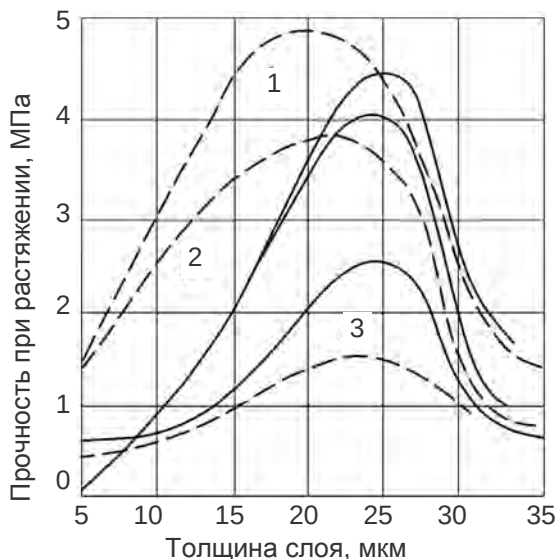


**Рис. 13.8.** Зависимость прочности при растяжении от толщины битумного слоя при температуре:  
1 – 20°C; 2 – 0°C; 3 – +20°C (сплошные линии – битум БНД 60/90);  
пунктирные – битум БНД 130/200)

прочность сцепления битумной пленки с поверхностью минеральных частиц. Для образования химических соединений и прочной битумной пленки при использовании кислых пород в битум вводят катионоактивные ПАВ.

Для повышения прочности образуемой битумной пленки при введении минерального наполнителя Л.Б. Гезенцевем предложено активировать поверхность его зерен битумом с добавками ПАВ в процессе помола.

Минеральные частицы размером 0,14-0,001 мм в асфальтовых материалах принято относить к наполнителям, частицы 0,14-5 мм – к мелким и 5-40 мм к крупным заполнителям.

Основные свойства асфальтовых материалов тесно связаны с их структурой. Характерные для асфальтовых материалов при положительных температурах вязко-пластические свойства определяются, в основном, особенностями структуры дисперсной системы битум – минеральный наполнитель, такой системой представлены в основном различные асфальтовые мастики. В асфальтовых бетонах эта система выполняет роль вяжущего материала.

Асфальтовые мастики и бетоны являются вязко-упруго-пластичными материалами. В зависимости от состояния и условий деформирования ими могут проявляться преимущественно упругие или вязко-пластические свойства. В большинстве случаев совокупность указанных свойств проявляется одновременно.

**Мастики.** В группу мастик входят пластические вещества, получаемые смешиванием органических вяжущих с тонкодисперсными порошкообразными или волокнистыми наполнителями. В качестве порошкообразных наполнителей применяют тонкомолотые минеральные вещества – известняк, доломит, мел, тальк, трепел, золу, цемент и др., в качестве волокнистых наполнителей – низкие сорта асбеста, минеральную вату и др. В состав мастик в зависимости от назначения и особенностей компонентов может входить от 10 до 70% наполнителей. Название мастики обычно указывает вид используемого вяжущего: битумная, дегтевая, резинобитумная и др.

По способу применения мастики бывают горячими и холодными. *Горячие мастики* применяют с предварительным разогревом до 130-180°C. Они быстро затвердевают в результате уменьшения вязкости вяжущих при охлаждении, обладают высокой водоустойчивостью и клеящей способностью. Вместе с тем их применение сопряжено с рядом трудностей: опасностью работы с горячими материалами, повышенной липкостью, необходимостью обогрева транспортирующих устройств и др. Эти трудности устраняются при применении *холодных мастик*, позволяющих механизировать гидроизоляционные работы, повысить их производительность и улучшить условия труда. Кроме того, холодные мастики позволяют получать более тонкий обмазочный слой и экономично расходовать органические вяжущие.

Холодные мастики представляют собой смеси органических вяжущих, разжиженных разбавителями, или водоземлемыми паст с минеральными наполнителями. В качестве разбавителей применяют

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

---

бензин, лигроин, уайт-спирит, керосин, нефтяное масло и др. Холодные мастики при нормальной температуре среды применяют без нагрева. Их твердение происходит за счет улетучивания разбавителя или испарения воды.

В зависимости от назначения мастики разделяют на кровельные, гидроизоляционные, герметизирующие, шпаклевочные, футеровочные и др.

Для *кровельных мастик*, используемых при склеивании рулонных материалов и гидроизоляции кровель, основными показателями являются теплоустойчивость – минимальная температура, при которой 2-миллиметровый слой мастики, склеивающий два образца пергамина или толя, не вытекает при выдерживании в течение 5 ч под углом 45°, и растяжимость – способность 2-миллиметрового слоя мастики, нанесенного на рулонный материал, не давать при температуре 18-20°C трещин при медленном изгибании по полуокружности стержня определенного диаметра. Теплоустойчивость указывается при обозначении марки (МБК-Г-55; МБК-Г-75 и др.) и колеблется для битумных мастик от 55 до 100°C.

Мастики характеризуются нормальной склеивающей способностью в том случае, когда расщепление двух склеенных ими образцов пергамина (толя) будет происходить по картону не менее чем на половине склеенной площади.

Из кровельных мастик наиболее широкое распространение получили битумные композиции. Свойства битумных мастик существенно улучшаются в результате модифицирования битумов различными синтетическими полимерами.

*Дегтевые мастики* применяют для наклеивания толевых материалов. Вяжущими в них служат дегти и их смеси с полимерами.

*Гидроизоляционные мастики* применяют для создания гидроизоляционных обмазок и заполнения деформационных швов. Важнейшими требованиями к гидроизоляционным мастикам являются пониженные значения водонасыщения и набухания, достаточная деформативность.

В табл. 13.4 приведены основные требования к горячим гидроизоляционным асфальтовым мастикам.

Для штукатурной гидроизоляции и устройства безрулонных кровель широко применяются холодные асфальтовые мастики, получаемые путем смешивания битумных паст с минеральными напол-

нителями. Они обладают повышенным водопоглощением по сравнению с горячими асфальтовыми мастиками, однако с течением времени процесс поглощения воды затухает. Достоинствами холодных асфальтовых мастик являются повышенная прочность и теплоустойчивость, возможность высокой механизации работ при использовании обычного серийного оборудования (битумные котлы, растворомешалки, растворонасосы).

Таблица 13.4

Физико-механические показатели гидроизоляционных асфальтовых мастик

| Показатель                                            | Категория теплоустойчивости |       |       |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------|-------|-------|
|                                                       | I                           | II    | III   |
| Температура размягчения, °С                           | 90-105                      | 75-90 | 60-75 |
| Глубина проникновения иглы при +25°С не менее, 0,1 мм | 5                           | 10    | 15    |
| Растяжимость при 25°С не менее, см                    | 0,5                         | 1,5   | 3     |
| Водонасыщение под вакуумом по массе не более, %       | 0,5                         | 0,3   | 0,1   |
| Набухание под вакуумом по объему не более, %          | 0,05                        | 0,05  | 0,05  |

Из битумно-полимерных мастик распространены битумно-резиновые, битумно-латексные и битумно-эпоксидные композиции.

**Асфальтовый бетон.** Асфальтовым бетоном называют материал, получаемый в результате затвердевания уплотненной и рационально подобранной однородной смеси асфальтового вяжущего и минеральных заполнителей (рис. 13.9). В качестве минеральных заполнителей служат песок и щебень или гравий.

Асфальтобетонные смеси в зависимости от вязкости используемого битума и температуры при укладке подразделяют на:

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

- *горячие*, приготавливаемые с использованием вязких и жидких нефтяных дорожных битумов и укладываемые с температурой не менее 120°C;

- *холодные*, приготавливаемые с использованием жидких нефтяных дорожных битумов и укладываемые с температурой не менее 5°C.

Горячие смеси в зависимости от наибольшего размера минеральных зерен подразделяют на: *крупнозернистые* с размером зерен до 40 мм; *мелкозернистые* – до 20 мм; *песчаные* – до 5 мм.

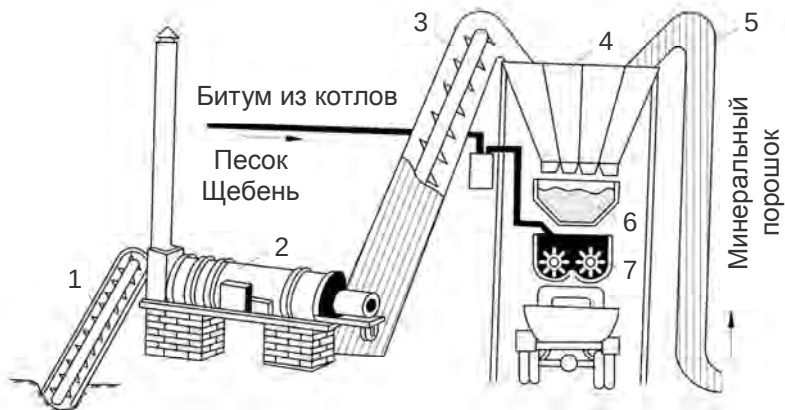


**Рис. 13.9.** Технологическая схема производства асфальтобетона:

1 – элеватор для песка и щебня; 2 – сушильный барабан;  
3 – "горячий элеватор"; 4 – бункер с виброгрохотом; 5 – элеватор минерального порошка; 6 – дозатор; 7 – лопастная мешалка

Холодные смеси подразделяют на мелкозернистые и песчаные.

Асфальтобетоны из горячих смесей в зависимости от величины остаточной пористости подразделяют на: *высокоплотные* с остаточной пористостью от 1,0 до 2,5%; *плотные* – св. 2,5 до 5,0%; *пористые* – св. 5 до 10%; *высокопористые* – св. 10 до 18%.

Асфальтобетоны из холодных смесей должны иметь остаточную пористость свыше 6 до 10%.

Щебеночные и гравийные горячие смеси и плотные асфальтобетоны в зависимости от содержания в них щебня (гравия) подразделяют на три типа: А с содержанием щебня св. 50 до 60%; Б – св. 40 до 50%; В – св. 30 до 40%.



Асфальтобетонные смеси в зависимости от удобоукладываемости бывают жесткие, пластичные и литые. По мере уменьшения жесткости смесей затрудняется раскладка массы, однако облегчается ее уплотнение.

По назначению асфальтовые бетоны классифицируют на дорожные, аэродромные, кислотостойкие, декоративные и гидротехнические. Гидротехнический асфальтобетон предназначен для постоянной работы в воде и должен отличаться повышенной водонепроницаемостью, водоустойчивостью, эластичностью и теплостойкостью.

В дорожном и аэродромном строительстве наиболее широкое применение нашли горячие асфальтобетонные смеси, покрытия из которых можно устраивать на дорогах любой грузонапряженности, и вводить в эксплуатацию уже через несколько часов после укладки. Холодные асфальтобетоны применяют на дорогах с малой интенсивностью движения и для ремонта покрытий. Они обладают меньшей прочностью и водостойкостью, их предпочтительно применять при пониженных температурах.

Крупнозернистые асфальтобетоны применяют для устройства нижних слоев покрытий и оснований. Для устройства верхних слоев покрытий наиболее широко применяют мелкозернистые асфальтобетоны, являющиеся наиболее однородными и обладающие большей коррозионной и сдвигоустойчивостью. Применение песчаного бетона требует учета его повышенной пластичности, необходимости подбора наиболее плотной минеральной смеси для предотвращения существенных отклонений в необходимом содержании битума. Обычно песчаные бетоны применяют для устройства покрытий на автомобильных дорогах с легким движением.

Содержание в асфальтобетоне щебня придает поверхности необходимую шероховатость. Мелкозернистые многощебенистые смеси применяют на участках с большими продольными уклонами при тяжелом и интенсивном движении, малощебенистые применяют для устройства верхнего слоя двухслойных покрытий при средней интенсивности движения с дополнительным втопливанием щебня для создания шероховатой поверхности.

Преимущественное применение в практике строительства автомобильных дорог находят уплотняемые асфальтобетоны. Литой асфальтобетон обладает высокой коррозионной стойкостью, меньше подвержен износу, однако имеет пониженную сдвигоустойчивость

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

---

и склонность к образованию трещин вследствие повышенного количества битума. Вместе с тем положительные особенности литого асфальтобетона способствуют его достаточно широкому применению в ряде стран.

Верхние слои дорожной одежды изготавливают только из плотного асфальтобетона. Пористые его разновидности могут быть использованы для устройства нижнего слоя покрытия или для основания.

Асфальтобетонные смеси и асфальтобетоны в зависимости от показателей физико-механических свойств и применяемых материалов подразделяют на марки: для горячих – I, II и III, для холодных – I и II.

*Марка* является интегральным показателем качества асфальтобетона, характеризующим его предел прочности при сжатии при температурах 50, 20 и 0°C, а также предел прочности при раскалывании при 0°C, водостойкость при длительном водонасыщении, коэффициент внутреннего трения и сцепление при сдвиге. Эти показатели для каждой из марок устанавливаются по ГОСТ 9128-2009.

Прочностные свойства асфальтобетона определяют его способность сопротивляться без разрушения внутренним напряжениям, возникающим при их нагружении в определенных температурных условиях. Отношение показателей прочности при 20 и 50° характеризует *теплоустойчивость*, а при 20 и 0°C *хрупкость* или *пластичность* асфальтобетона.

Нормируемые по ГОСТ 9128-2009 значения прочности и водостойкости для асфальтобетонов из горячих смесей различных марок приведены в табл. 13.5.

При недостаточной теплоустойчивости в покрытиях развиваются деформации сдвига, вызывающие оплывание асфальтового бетона на откосах, а при недостаточной эластичности снижается деформативная способность и трещиностойкость этого материала при низких температурах.

Для асфальтобетона как для термопластичного материала различают поведение под нагрузкой в упругой стадии, приводящее по мере увеличения нагрузки к разрушению покрытия, и в пластической стадии, приводящее к возникновению недопустимых деформаций.

Таблица 13.5

## Прочностные показатели асфальтобетонов

| Марка асфальтобетона | Дорожно-климатическая зона | Предел прочности при сжатии, МПа, не менее при температуре |      |      | Водостойкость не менее | Водостойкость при длительном водонасыщении, не менее |
|----------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------|------|------|------------------------|------------------------------------------------------|
|                      |                            | 50°C                                                       | 20°C | 0°C  |                        |                                                      |
| I                    | I                          | 0,9-1,1                                                    | 2,5  | 9,0  | 0,95                   | 0,90                                                 |
|                      | II, III                    | 1,1-1,3                                                    | 2,5  | 11,0 | 0,9                    | 0,85                                                 |
|                      | IV, V                      | 1,1-1,6                                                    | 2,5  | 13,0 | 0,85                   | 0,75                                                 |
| II                   | I                          | 0,8-1,1                                                    | 2,2  | 10,0 | 0,9                    | 0,85                                                 |
|                      | II, III                    | 0,9-1,3                                                    | 2,2  | 12,0 | 0,85                   | 0,75                                                 |
|                      | IV, V                      | 1,0-1,5                                                    | 2,2  | 13,0 | 0,8                    | 0,7                                                  |
| III                  | I                          | 0,8-1                                                      | 2,0  | 10,0 | 0,85                   | 0,75                                                 |
|                      | II, III                    | 0,9-1,1                                                    | 2,0  | 12,0 | 0,75                   | 0,65                                                 |
|                      | IV, V                      | 1,1-1,2                                                    | 2,0  | 13,0 | 0,7                    | 0,6                                                  |

Особенностью разрушения асфальтобетона по сравнению с цементобетоном является резко выраженная зависимость прочности от времени действия нагрузки и температуры (рис. 13.10).

На прочность асфальтобетона определяющее значение оказывают сцепление частиц между собой и внутреннее трение, возникающее между ними. Сцепление частиц в асфальтовом бетоне повышается с увеличением вязкости битума, если количество битума превышает оптимальное, величина сцепления снижается (рис. 13.11) и соответственно уменьшается прочность.

Внутреннее трение асфальтобетона определяется гранулометрическим составом минеральной части, формой и характером поверхности минеральных частиц. Оно растет с увеличением размера частиц, при замене гравия на щебень, окатанного речного песка на песок, полученный дроблением горных пород. Избыточное содержание битума, снижая величину сцепления частиц, одновременно уменьшает и внутреннее трение асфальтобетона.

Большое влияние на прочность оказывает плотность асфальтобетона, которая зависит от плотности минеральной смеси, соотношения расходов щебня и песка (рис. 13.12) вида и количества битума и степени уплотнения.

Плотность асфальтобетона влияет также на его водопоглощение, определяемое количеством сообщающихся между собой пор и во-

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

доустойчивость – отношение пределов прочности на сжатие водонасыщенных и сухих образцов при 20°C.

Разрушение асфальтобетона в условиях эксплуатации дорожных

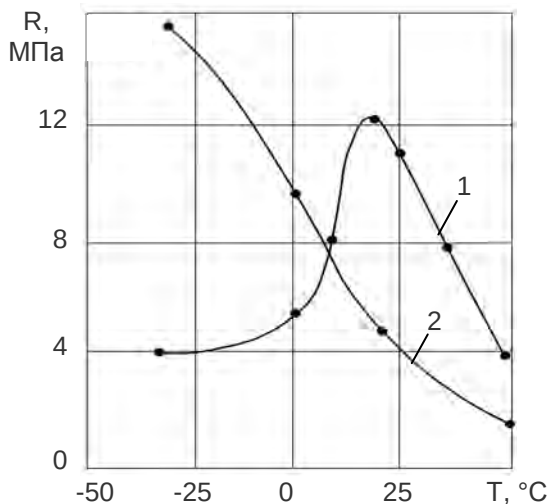


**Рис. 13.10.** Зависимость предела прочности асфальтобетона от температуры: 1 – на изгиб при скорости деформирования 250 мм/мин; 2 – на сжатие при скорости деформирования 3 мм/мин

покрытий всегда носит усталостный характер. Зависимость прочности асфальтобетона ( $R_\tau$ ) от длительности ( $\tau$ ) действия нагрузки ( $P$ ) приближается к виду:

$$R_\tau = R\tau^{-p}, \quad (13.5)$$

где  $R$  – прочность при  $\tau = 1$  с.

Основным требованием, которому должен удовлетворять асфальтобетон, работающий в условиях повышенных положительных температур, является *сдвигоустойчивость*. На нее, кроме прочности при

сдвиге влияют угол внутреннего трения, силы защемления зерен при сдвиге и силы сцепления, обусловленные свойствами битума.

Сопротивление асфальтобетонов сдвигу ( $R_c$ ) в соответствии с теорией Н.Н.Иванова может быть выражено зависимостью:

$$R_c = P\varphi + C + \Sigma, \quad (13.6)$$

где  $P$  – нормальное давление на площадке сдвига;  $\varphi$  – угол внутреннего трения материалов;  $C$  – сцепление минеральных зерен;  $\Sigma$  – сцепление, обусловленное битумными связями.

Повышение угла внутреннего трения  $\varphi$  и сцепления минеральных зерен  $C$  достигается увеличением в составе асфальтобетона количества щебня.

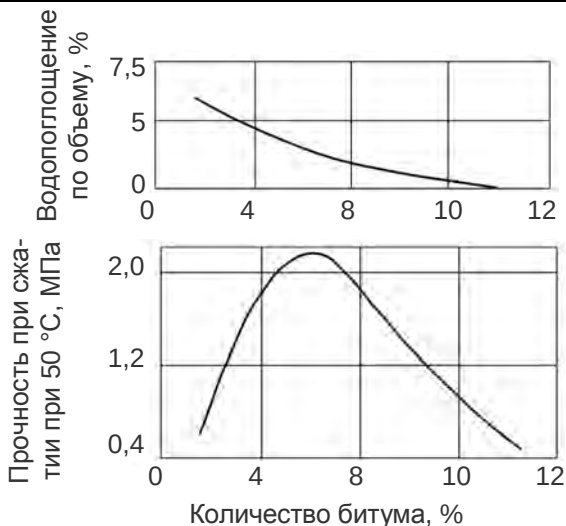


**Рис. 13.11.** Влияние содержания битума на свойства асфальтового бетона

Многосебенистый асфальтобетон имеет более высокую сдвигоустойчивость по сравнению с малоцебенистым в результате образования жесткого пространственного скелета из крупных зерен минеральной части. Повышение сдвигоустойчивости достигается также активированием минеральных материалов и созданием на их зернах контактных слоев высо-

коструктурированного битума.

Для характеристики *пластичности* асфальтобетона при положительных температурах служит показатель пластичности:

$$K_n = \frac{\lg R_1 / R_2}{\lg v_1 / v_2}, \quad (13.7)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – пределы прочности при сжатии, МПа;  $v_1$  и  $v_2$  – скорости деформирования.

Коэффициент пластичности  $K_n$  для асфальтобетона в дорожном покрытии должен быть не выше 0,17.

С увеличением пластичности снижается сдвигоустойчивость асфальтобетона. Повышенная пластичность характерна для песчаных асфальтобетонов, при избыточном количестве битума и неоптимальном содержании битума и минерального порошка.

Для асфальтобетона характерны хорошо выраженные релаксационные процессы, т.е. процессы “перерождения” упругой деформации в пластическую. На характер *релаксации* существенно влияет начальное напряжение (рис. 13.13). При высоком начальном напряжении процесс релаксации протекает интенсивнее, чем при низких. При высоких положительных температурах интенсивность снижения напряжений служит показателем деформационной устойчиво-

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

сти, а при низких – трещиноустойчивости асфальтобетона. Для удовлетворительной работы асфальтобетона в покрытии при высоких температурах необходимо чтобы релаксация напряжений происходила медленно, а при низких как можно быстрее. Время релаксации ( $\tau_p$ ) для упруго-вязких тел к которым можно отнести и асфальтобетоны, находится из зависимости:

$$\tau_p = \frac{\eta}{E} \quad (13.8)$$

где  $\eta$  – вязкость,  $E$  – модуль упругости.

Модуль упругости асфальтобетона при температурных колебаниях изменяется значительно меньше чем вязкость, поэтому все факторы, способствующие увеличению вязкости, будут удлинять время релаксации и наоборот.

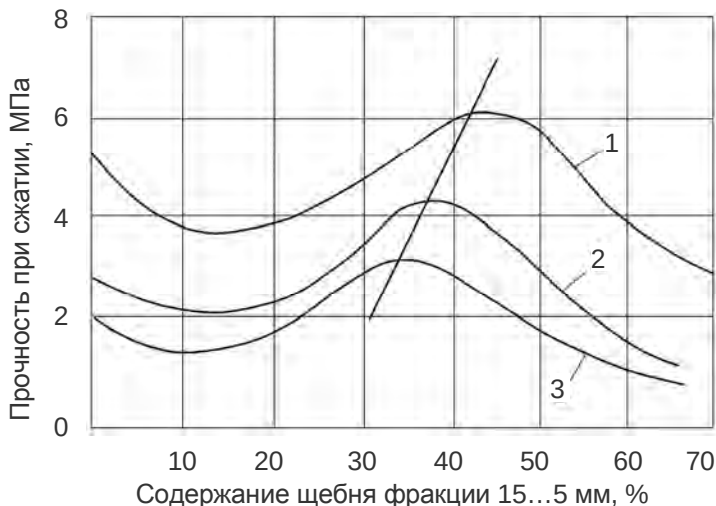


**Рис. 13.12.** Зависимость прочности асфальтобетона при сжатии от количества щебня:

1 – битум БНД 40/60; 2 – БНД 130/200; 3 – БНД 200/300

Обеспечение необходимых свойств асфальтового бетона в значительной мере достигается правильным выбором марки битума с учетом климатических условий, интенсивности движения автотранспорта, типа бетона и характера используемых материалов. На-

пример, для первой дорожно-климатической зоны при строительстве автомобильных дорог первой и второй категории для марки смеси I при получении плотного и высокоплотного асфальтобетона рекомендуется использовать битумы БН 90/130, БНД 130/200 и БНД 200/300. Для второй и третьей дорожно-климатических зон не следует применять битум БНД200/300, зато рекомендуется более вязкий битум БНД 90/130. Эта тенденция еще более усиливается для асфальтобетона, который должен эксплуатироваться в IV и V дорожно-климатических зонах. Для него рекомендуется использовать битумы марок БНД 40/60, БНД 60/90, БН 40/60 и 60/90. При повышении теплоустойчивости битумов важно в то же время для предотвращения излишней хрупкости асфальтобетона в зимний период, чтобы битум при повышенной температуре размягчения имел достаточную пенетрацию, характеризуемую глубиной погружения иглы.

По мере снижения категории и соответственно грузонапряженности дороги допускаются к применению менее вязкие битумные вяжущие.

Улучшение свойств асфальтобетонов достигается при введении различных добавок. Предложено и применяется большое количество добавок к битумным вяжущим: добавки-разжижители, пластификаторы, добавки, улучшающие адгезию битумов к минеральным материалам, повышающие огнестойкость, устойчивость к микроорганизмам и др. Разжижающие добавки содержат углеводороды близкие по составу к углеводородам, входящим в состав битумов. Это лигроин, керосин, мазут и др., вводимые в битум от 2 до 50% в зависимости от требуемой вязкости. Применение разжижителей, содержащих ароматические углеводороды, приводит к пластификации битумов. К добавкам, улучшающим адгезию битума к минеральным материалам, относятся поверхностно-активные вещества (ПАВ), содержащие полярные группы и увеличивающие подвижность звеньев высокомолекулярных соединений. Анионоактивные ПАВ вводят в количестве 3-10%. Они повышают сцепление битумов, в основном с карбонатными материалами. Катионоактивные ПАВ вводятся в меньшем количестве (0,5-3%) и повышают сцепление со всеми каменными материалами, особенно кислыми.

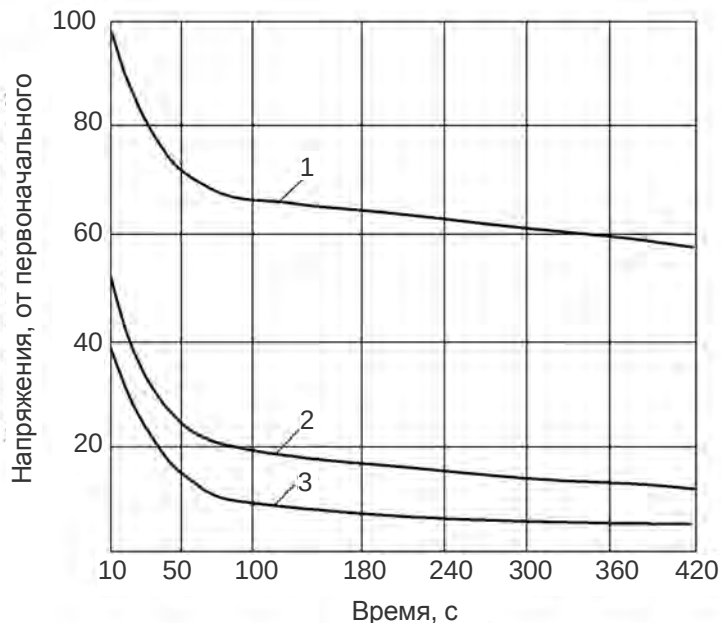


**Рис. 13.13.** Влияние содержания битума на релаксацию напряжений в асфальтовом вяжущем:  
1 – битум в смеси 15%; 2 – 20%; 3 – 25%

Важнейшим компонентом асфальтобетонов является наполнитель, который улучшает основные свойства материала, связывает битум на своей поверхности и структурирует его. Минеральный наполнитель способствует повышению прочности асфальтового вяжущего (рис. 13.14) плотности асфальтобетона и снижению расхода битума. В качестве наполнителя применяют тонкоизмельченные низкогидрофильные порошки из основных материалов - известняков, доломитов и асфальтовых пород. Иногда используют также пылеватые отходы промышленности. Содержание глинистых частиц в наполнителе должно быть не более 5%. Оптимальной является дисперсность порошка, при которой его удельная поверхность составляет  $4000-5000 \text{ см}^2/\text{г}$ . Минеральный порошок, полученный из кислых горных пород, не оказывает на битум необходимого структурирующего влияния. Для снижения содержания битума пористость минеральных порошков должна быть не более 35%. Набухание в воде смеси порошка с битумом не должно превышать 2,5%.



Эффективный способ улучшения качества наполнителя - его активизация обработкой битумом и поверхностно-активными веществами в процессе измельчения.

Основную часть асфальтобетонов по массе составляет минеральная смесь песка и щебня (рис. 13.15).

Пески применяют природные и дробленые из отсеков. желательно применение песков с остроугольными частицами, а также фракционированных, полученных смешением отдельных фракций в соотношении, обеспечивающем наибольшую плотность. По основным качественным показателям песок должен отвечать требованиям, стандартизованным на песок для строительных работ (ГОСТ 8736-93).

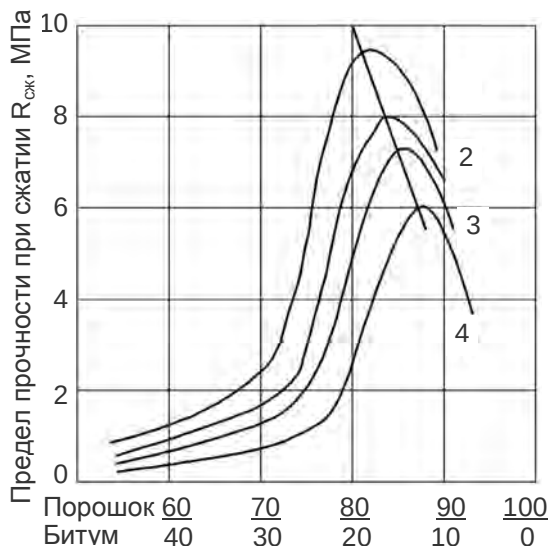


**Рис. 13.14.** Влияние минерального наполнителя на прочность асфальтового вяжущего:

1 – битум БНД 40/60; 2 – БНД 90/130;  
3 – БНД 130/200; 4 – БНД 200/300

Одним из наиболее эффективных способов улучшения свойств песка является его физико-химическая активизация, производимая в условиях обнажения новых поверхностей зерен. Активизация песка может быть выполнена путем совместного дробления с известью, (2,5-4,5% массы песка) которая, активируя гидрофильную поверхность его зерен, одновременно является активным наполнителем битума, способствующим его структурирова-

нию и частично заменяющим минеральный порошок. Эффект активизации проявляется тем лучше, чем ниже качество исходного песка.

В качестве крупного заполнителя для асфальтобетонов применяют щебень, полученный дроблением горных пород, металлурги-

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

ческих шлаков, а также гравий. Марки по прочности, истираемости и морозостойкости щебня назначаются в зависимости от требуемой марки асфальтобетонной смеси.

Из методов проектирования составов асфальтобетона наиболее распространен метод, включающий определение гранулометрического состава щебня, песка и наполнителя; выбор соотношения между минеральными материалами из условия получения достаточно плотных смесей; назначение ориентировочного количества вяжущего с последующим его корректированием пробными замесами и испытанием образцов.

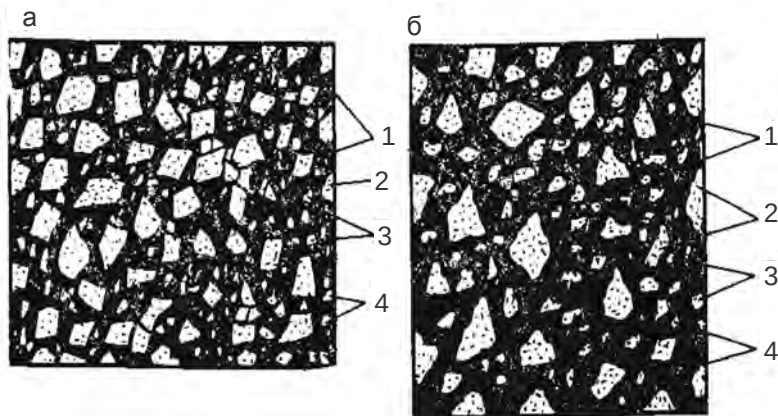


**Рис. 13.15.** Структура асфальтобетона: а – многощебенистого (каркасного); б – малощебенистого (бескаркасного); 1 – асфальтовое вяжущее; 2 – щебень; 3 – песок; 4 – поры

Исследованиями В.В. Охотина и Н.Н. Иванова было показано, что между плотностью и зерновым составом смеси имеется определенная зависимость. Наибольшая плотность минеральной смеси достигается в том случае, когда зерна каждой последующей фракции уменьшаются примерно в 2 раза:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{d_2}{d_3} \dots \frac{d_{m-1}}{d_m} = 2, \quad (13.9)$$

где  $d_1$  – наибольший размер зерен минеральной смеси, устанавливаемый в зависимости от типа асфальтобетона;  $d_m$  – наименьший размер зерен.

Величина, показывающая, во сколько раз количество последующей фракции меньше предыдущей, называется *коэффициентом сбега* (К). Наилучшие результаты по получению плотных минеральных смесей достигаются при  $K = 0,7-0,9$ .

Задавшись граничными значениями К – можно построить область зернового состава минеральной смеси, в пределах которой должен располагаться зерновой состав конкретной рассчитываемой смеси. Если масса первой фракции  $m_1=y_1$ , то массу второй фракции можно найти из условия  $m_2=y_1K$ , третьей -  $m_3=y_2K=y_1K^2$ ,  $n^{ой}$  – фракции –  $m_n=y_{n-1}K=y_1K^{n-1}$ .

В табл. 13.6 приведены рекомендуемые зерновые составы минеральных смесей для мелкозернистых горячих асфальтобетонов.

Ориентировочное количество битума рассчитывают с учетом рекомендаций табл. 13.7 по формуле:

$$B = \frac{(V_{пор}^0 - V_{пор}) \rho_{\delta}}{\rho_0}, \quad (13.10)$$

где  $V_{пор}^0$  – пористость минеральной части испытанных образцов, %;

$\rho_0$  – плотность минеральной части асфальтобетона, г/см<sup>3</sup>;  $V_{пор}$  – заданная остаточная пористость асфальтобетона, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{\delta}$  – истинная плотность битума при 20°C, г/см<sup>3</sup>.

Таблица 13.6

Зерновой состав мелкозернистых смесей для горячего асфальтобетона

| Тип смеси | Количество частиц, % мельче данного размера |        |        |       |       |          |          |           |          |           |
|-----------|---------------------------------------------|--------|--------|-------|-------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|           | 20                                          | 15     | 10     | 5     | 2,5   | 1,2<br>5 | 0,6<br>3 | 0,3<br>15 | 0,1<br>4 | 0,07<br>1 |
| А         | 95-100                                      | 78-100 | 60-100 | 35-50 | 24-38 | 17-28    | 12-20    | 9-15      | 6-11     | 4-10      |
| Б         | 95-100                                      | 85-100 | 70-100 | 50-65 | 38-52 | 28-39    | 20-29    | 14-22     | 9-16     | 6-12      |
| В         | 95-100                                      | 88-100 | 80-100 | 65-80 | 52-66 | 39-53    | 29-40    | 12-20     | 8-14     |           |

Ориентировочное содержание битума в  
асфальтобетонных смесях

| Вид смеси                 | Содержание битума, % по массе |
|---------------------------|-------------------------------|
| Горячие                   |                               |
| высокоплотные             | 4,0-6,0                       |
| плотные типов             |                               |
| А                         | 4,5-6,0                       |
| Б                         | 5,0-6,5                       |
| В                         | 6,0-7,0                       |
| Г и Д                     | 6,0-9,0                       |
| пористые                  | 3,5-5,5                       |
| высокопористые щебеночные | 4,0-6,0                       |
| высокопористые песчаные   | 4,0-6,0                       |
| высокопористые щебеночные | 2,5-4,0                       |

Содержание битума, уточняемое экспериментально, должно обеспечить требуемую остаточную пористость, определяемую по величине водонасыщения.

Готовая асфальтобетонная смесь с температурой 140-160°C транспортируется на строительный объект, где укладывается на специальную основу механическими укладчиками и уплотняется при помощи статических и вибрационных катков, поверхностных вибраторов и других специальных виброуплотнителей. Основание под асфальтовый бетон должна быть уплотненным, сухим и ровным, обеспечивать хорошее сцепление и принимать без значительных деформаций эксплуатационные нагрузки.

Близкими к асфальтобетонам по природе вяжущих и свойствам являются дегтебетоны.

*Дегтебетоны* – материалы, полученные уплотнением смеси дегтевых вяжущих, заполнителей и минерального порошка. В зависимости от вязкости дегтя дегтебетонные смеси разделяют на горячие и холодные. Для получения горячих смесей используют окисленные дегти и дегти, модифицированные добавками полимеров (поливинилхлорида, полистирола и др.) марок Д-6 и Д-5, а для холодных – Д-4 и Д-5 (марки дегтя отличаются вязкостью).

В зависимости от крупности зерен щебня дегтебетоны подразделяют на крупнозернистые (размер зерен до 40 мм) и мелкозернистые (менее 20 мм). Увеличение в бетоне количества щебня способствует повышению его плотности, водостойкости, коррозионной стойкости и стойкости против истирания. По показателям пористости дегтебетоны бывают плотными (пористость до 5%) и пористыми (6-12%). Введение в дегтебетоны минеральных порошков, полученных дроблением карбонатных пород, способствует повышению их плотности, прочности, водо- и морозостойкости.

Показатели физико-механических свойств плотных дегтебетонов должны соответствовать нормам, приведенным в табл. 13.8.

Таблица 13.8

Свойства плотных дегтебетонов из горячих смесей

| Показатели                                                  | Дегтебетоны из смесей марок |     |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----|
|                                                             | I                           | II  |
| Предел прочности при сжатии, при 20°C. МПа                  |                             |     |
| не менее                                                    | 2,2                         | 1,6 |
| не более                                                    | 6,0                         | 6,0 |
| при 50°C для дегтебетонов из щебеночных и гравийных смесей, |                             |     |
| не менее                                                    |                             |     |
| типов                                                       |                             |     |
| Б                                                           | 0,8                         | 0,6 |
| В                                                           | -                           | 0,9 |
| песчаных смесей                                             | 0,9                         | 0,7 |
| Коэффициент водостойкости, не менее                         | 0,8                         | 0,6 |
| Набухание, % по объему, не менее                            | 0,7                         | 0,5 |

Дегтебетоны рекомендуется использовать для верхнего слоя дорог 3-й категории и нижнего слоя дорог 3-й и 4-й категорий. Устройство таких покрытий разрешается за пределами населенных пунктов, поскольку во время их эксплуатации возможно выделение фенола.

#### **13.4. Рулонные кровельные и гидроизоляционные материалы**

Рулонные материалы поставляют в рулонах длиной обычно 10-30 м. Их подразделяют на *основные*, получаемые путем пропитки органическими вяжущими основы (картона, стеклоткани и др.), и *безосновные*, изготавливаемые прокаткой смесей вяжущих с наполнителями. Основные и безосновные рулонные материалы применяют для устройства кровель и гидроизоляции. Специфические требования, предъявляемые к кровельным материалам, – атмосферо- и теплостойкость, гидроизоляционным – водонепроницаемость, биостойкость. Кровля из рулонных материалов для зданий промышленного и гражданского назначения выполняется в три – пять слоев в виде кровельного ковра, укладываемого по сплошному основанию. Для устройства верхних слоев применяют материалы с улучшенными физико-механическими свойствами, для нижних – подкладочные рулонные материалы.

Клеечная гидроизоляция из рулонных материалов также выполняется в виде многослойного покрытия.

**Основные рулонные материалы.** Материалы этой группы разделяют на *беспокровные* и *покровные*. Первые получают пропиткой основы без последующего нанесения покровного слоя, вторые – нанесением на пропитанную основу с обеих сторон защитных покровных слоев, обеспечивающих повышенные технические свойства и долговечность материалов.

Рулонные материалы могут быть изготовлены на картонной, асбестовой, стекловолоконистой основе, а также основе из полимерных волокон и комбинированной основе. В соответствии с ГОСТ 30547-97 по виду вяжущего и основного компонента покровного состава рулонные материалы подразделяют на битумные, битумно-полимерные и полимерные. На основе дегтевых вяжущих в очень

ограниченном количестве изготавливают рулонный материал – *толь*, который применяют в основном для устройства кровель временных сооружений, для паро- и гидроизоляции. По виду защитного слоя рулонные материалы подразделяют на материалы с посыпкой, фольгой и пленкой.

В зависимости от вида основы нормируется разрывная сила при растяжении рулонных материалов. Для ненаплавливаемых материалов на картонной основе она должна быть не менее 215, наплавливаемых – 274, на стекловолокнуистой основе – 294, основе из полимерных волокон – 343 и комбинированной – 392Н.

Битумные и битумно-полимерные материалы должны выдерживать испытание на гибкость и теплостойкость в условиях, приведенных в табл. 13.9. Образцы считаются выдержавшими испытание на гибкость, если после испытания изгибанием на бруске на их лицевой поверхности не появляются трещины и отслаивание вяжущего или посыпки.

Таблица 13.9

Условия испытания на гибкость и теплостойкость битумных и битумно-полимерных рулонных материалов

| Вид материалов         | Условия испытания рулонных материалов |                         |                         |                                     |
|------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
|                        | на гибкость                           |                         | на теплостойкость       |                                     |
|                        | брус с закруглением радиусом, мм      | температура °С, не выше | температура °С, не ниже | длительность испытания, ч, не менее |
| Битумные:              |                                       |                         |                         |                                     |
| на картонной основе    | 25                                    | 5                       |                         |                                     |
| на волокнуистой основе | 25                                    | 10                      | 70                      | 2                                   |
| Битумно-полимерные     | 25                                    | -15                     | 85                      | 2                                   |

**Примечание.** Условия испытания на теплостойкость приведены для кровных материалов

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

---

После испытания на теплостойкость на поверхности образцов не должны наблюдаться вздутия, следы перемещения покровного слоя или вяжущего и сползание посыпки.

Температура хрупкости покровного состава для наплавливаемых материалов должна быть не выше минус 15°C, битумно-полимерных – минус 25°C.

Для рулонных материалов нормируется водопоглощение и водонепроницаемость. При испытании в течение 24 ч водопоглощение их (кроме пергамина) должно быть не более 2%. Рулонные кровельные материалы должны быть водонепроницаемыми в течение не менее 72 ч при давлении не ниже 0,001 МПа. Для гидроизоляционных материалов требования по водонепроницаемости существенно выше. Они должны выдерживать давление воды не менее 0,2 МПа в течение не менее 2 ч.

К распространенным беспокровным материалам относятся *пергамин* и *гидроизол*, получаемые пропиткой основы нефтяными битумами.

Основой для пергамина является кровельный картон массой 1 м<sup>2</sup> 350г (П-350), изготовленный из переработанной смеси тряпья, макулатуры и древесной волокнистой массы. Пергамин применяют преимущественно как подкладочный материал для нижних слоев кровельного ковра. Он должен выдерживать разрывную нагрузку не менее 265Н, иметь водопоглощение в течение 24 ч не более 20% быть водонепроницаемым при давлении до 0,01 МПа в течение не менее 10 мин.

Основой для *гидроизола* служит асбестовая бумага. Его изготавливают марок ГИ-Г и ГИ-К. Гидроизол ГИ-Г применяют для изоляции подземных сооружений и подземной части многоэтажных зданий, антикоррозионной защиты металлических трубопроводов (кроме тепловых сетей), а гидроизол ГИ-К – для гидроизоляции плоских кровель.

Наиболее распространенным покровным основным материалом является *рубероид*, получаемый пропиткой кровельного картона нефтяными битумами с последующим нанесением битумного вяжущего с наполнителем на обе стороны полотна как покровного слоя. На покровный слой дополнительно наносится минеральная посыпка. Рубероид в зависимости от назначения подразделяется на кровельный и подкладочный. Первый служит для устройства верх-



него слоя кровельного ковра, второй - нижних слоев кровельного ковра и гидроизоляции конструкций. В зависимости от назначения, марки картона и вида посыпки рубероид разделяют на марки (табл. 13.10).

Таблица 13.10

Характеристика рубероида

| Назначение и марка рубероида                                     | Марка картона | Вид посыпки полотна |                  | Площадь рулона, м <sup>2</sup> (±0,5) |
|------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|------------------|---------------------------------------|
|                                                                  |               | с лицевой стороны   | с нижней стороны |                                       |
| Кровельный для верхнего слоя кровельного ковра:                  |               |                     |                  |                                       |
| РКК-500                                                          | 500           | Крупно-зернистая    | Пылевидная       | 10                                    |
| РКК-450                                                          | 450           | -"-                 | -"-              | 10                                    |
| РКЦ-500                                                          | 500           | -"-                 | -"-              | 10                                    |
| Кровельный для верхнего слоя кровельного ковра с защитным слоем: |               |                     |                  |                                       |
| РКП-450                                                          | 450           | Пылевидная          | -"-              | 15                                    |
| Подкладочный для нижних слоев кровельного ковра:                 |               |                     |                  |                                       |
| РПП-400                                                          | 400           | -"-                 | -"-              | 20                                    |
| РПЭ-400                                                          | 400           | -"-                 | -"-              | 20                                    |
| Для авиастроения                                                 |               |                     |                  |                                       |
| РПЭ-600                                                          | 600           | -"-                 | -"-              | 20                                    |

Качественные показатели рубероида различных марок (ГОСТ 10923-2006)

| Наименование показателя                               | Норма для рубероида марок     |         |         |         |         |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                                       | РКК-500<br>РКЦ-500<br>РЭП-600 | РКК-450 | РКП-450 | РПП-400 | РПЭ-400 |
| Разрывная сила при растяжении, Н, не менее            | 333                           | 313     | 274     | 216     | 225     |
| Масса покровного состава, г/м <sup>2</sup> , не менее | 800                           | 800     | 800     | 500     | 600     |
| Водопоглощение в течение 24 ч, % по массе, не более   | 2,0                           | 2,0     | 2,0     | 2,0     | 2,0     |
| Потеря посыпки, г/образец, не более                   | 3,0*<br>2,0**                 | 3,0     | -       | -       | -       |

\*Для марки РКК-500

\*\*Для марки РКЦ-500, РЭП-600

В наименовании марки рубероида вторая буква указывает его назначение: для верхнего слоя кровельного ковра (К), для нижнего – подкладочного слоя (П), Последняя буква характеризует вид или особенности посыпки: К – крупнозернистая, П – пылевидная, Ц – цветная. В марках РЭП-600 и РПЭ буква “Э” указывает на эластичность рубероида. Цифра в обозначении марки рубероида указывает

марку картона т.е. его массу в граммах на  $1 \text{ м}^2$ . Рубероид выпускается в рулонах с шириной полотна 1000, 1025 и 1050 мм общей площадью 7,5-20  $\text{м}^2$ .

Технологический процесс изготовления рубероида (рис. 13.16) состоит из четырех переделов:

1) пропитки движущегося полотна картона мягким кровельным битумом; 2) нанесения тугоплавкого битумно-минерального покровного слоя; 3) образования защитного слоя из минеральной посыпки; 4) охлаждения готового материала.

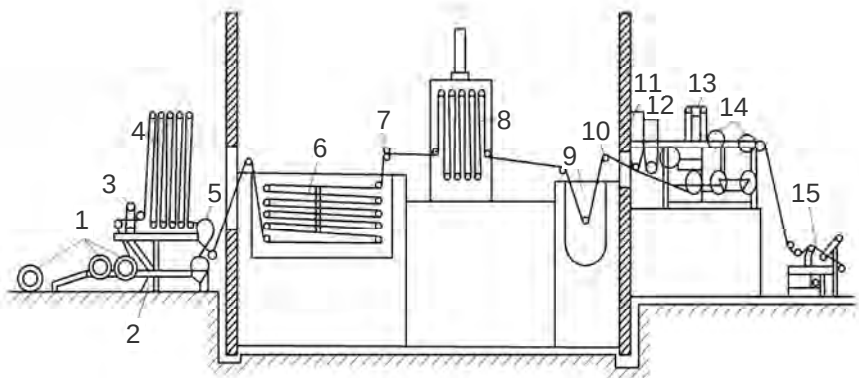


**Рис. 13.16.** Схема установки по производству рубероида:

- 1 – катушка с картоном; 2 – размоточный станок; 3 – сшивной станок; 4 – магазин запаса картона; 5 – сушильные цилиндры; 6 – пропиточная ванна; 7, 10 – отжимные валки; 8 – камера для дополнительного пропитывания; 9 – покровная ванна; 11, 12, 13 – бункеры для посыпки; 14 – охлаждающие барабаны; 15 – намоточный станок

Рубероид с эластичным покровным слоем получают при введении в покровную массу растворенной резины (например, де вулканизированной резиновой крошки) и минерального наполнителя.

Наряду с обычным изготавливается *наплавляемый рубероид*, приклеиваемый безогневым способом растворителем за счет пластификации покровного слоя или оплавлением с помощью

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

специальных горелок. Наплавляемый рубероид имеет утолщенный покровный слой на нижней поверхности.

Свойства рулонных материалов существенно улучшаются при замене кровельного картона стекло- и асбестоволокнистыми материалами и особенно металлической фольгой.

*Стеклорубероид* – рулонный кровельный и гидроизоляционный материал на стекловолоконной основе, получаемый нанесением с двух сторон битумного вяжущего и посыпки. Стеклорубероид в зависимости от назначения и вида посыпки на лицевой поверхности подразделяют на марки (табл. 13.12).

Таблица 13.12

Марки стеклорубероида

| Марка | Наименование                                         | Вид посыпки                                                                                | Область применения                                                                                                    |
|-------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| С-РК  | Стеклорубероид кровельный с крупнозернистой посыпкой | Крупнозернистая с лицевой стороны и мелкозернистая или пылевидная посыпка с нижней стороны | Для верхнего слоя кровельного ковра                                                                                   |
| С-РЧ  | Стеклорубероид кровельный с чешуйчатой посыпкой      | Чешуйчатая с лицевой стороны и мелкозернистая или пылевидная посыпка с нижней стороны      |                                                                                                                       |
| С-РМ  | Стеклорубероид гидроизоляционный                     | Мелкозернистая или пылевидная посыпка с двух сторон                                        | Для оклеечной гидроизоляции, нижних слоев кровельного ковра и для кровельного ковра, имеющего защитный покровный слой |

**Примечание.** Допускается вместо пылевидной и мелкозернистой посыпки использовать для защиты нижней или обеих сторон полотна полимерную пленку.

В качестве основы для стеклорубероида служит стекловолоконный холст, представляющий собой нетканый материал из хаотически расположенных стеклянных волокон, склеенных полимерами.

По сравнению с обычным для стеклорубероида характерны повышенная биостойкость, большая прочность при растяжении, низкое водопоглощение и высокая водонепроницаемость и теплостойкость. Физико-механические свойства стеклорубероида обуславливают его высокую долговечность в кровельных покрытиях и обклеочной гидроизоляции.

Рубероид, основой которого служат стеклохолст, стеклоткань, полиэфирные волокна, с полимерными добавками к битумному вяжущему известен как “*еврорубероид*”. Он имеет значительно более высокую долговечность, чем традиционный, характеризуется высокой прочностью, стабильностью размеров, стойкостью к воспламенению.

С использованием в качестве основы стеклоткани получают *гидростеклоизол*. В состав вяжущего при получении гидростеклоизола вводят полимерный модификатор – бутадие-стирольный термоэластопласт и специальные добавки – антиоксиданты, антистарители и др. Поверхности гидростеклоизола покрывают тонкой полимерной пленкой или крупнозернистой посыпкой (для верхнего слоя кровельного ковра). Близким по составу и свойствам к гидростеклоизолу является *эластобит* – модифицированный рулонный наплавляемый кровельный и гидроизоляционный материал, получаемый путем нанесения на стекловолоконную или полимерную основу модифицированного полимерно-битумного вяжущего.

*Фольгоизол* – рулонный материал, состоящий из рифленой алюминиевой фольги, покрытой с нижней стороны слоем битумно-резинового или битумно-полимерного вяжущего с минеральным наполнителем и антисептиком. Его разделяют на виды:

- ФК – фольгоизол кровельный, предназначенный для устройства верхнего слоя рулонного ковра кровель;

- ФГ – фольгоизол гидроизоляционный, предназначенный для устройства защитного покрытия тепловой изоляции трубопроводов. Теплостойкость кровельного фольгоизола – 100°C, гидроизоляционного – 110°C.

**Безосновные материалы.** К безосновным относится группа материалов на основе резино-битумных и битумно-полимерных вяжущих. Из них наибольшее применение нашел *изол* – безосновный рулонный

### 13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе

гидроизоляционный материал, получаемый из резино-битумного вяжущего с технологическими добавками. Он выпускается в рулонах с шириной полотна 800, 100 и 1100 мм, толщиной – 2 мм. Изол выпускают двух марок: И-БД – без полимерных добавок и И-ПД – с полимерными добавками. Физико-механические показатели изола, приведены в табл. 13.13.

Таблица 13.13

Физико-механические показатели изола

| Наименование показатели                              | Норма для изола марок |      |
|------------------------------------------------------|-----------------------|------|
|                                                      | И-БД                  | И-ПД |
| Условная прочность в МПа, не менее                   | 0,45                  | 0,60 |
| Относительное удлинение, % не менее                  | 55                    | 80   |
| Относительное остаточное удлинение, %, не более      | 25                    | 30   |
| Водопоглощение в течение 24 ч., % по массе, не более | 1,0                   | 0,8  |

Для изола характерны повышенная гибкость и теплостойкость (до 150°C). Его применяют для гидроизоляции гидротехнических сооружений, бассейнов, резервуаров, для устройства двух- и трехслойных пологих и плоских кровель. При эксплуатации покрытий из изола, следует учитывать его повышенную ползучесть и возможное деформирование в особенности на вертикальных поверхностях.

Близким к изолу по составу и свойствам является *бризол*, предназначенный для защиты трубопроводов подземных сооружений от воздействия грунтовых вод, гидроизоляции фундаментов, газо- и нефтепроводов и др. В составе бризола присутствует битум, резина и асбестовое волокно.

*Битумно-полимерный материал ГМП* получают из нефтяного битума, полиизобутилена и фенолформальдегидного полимера. Однородная смесь прокатывается при помощи каландров в полотнище, на которое наносится минеральная посыпка. ГМП рекомендуется для применения при устройстве гидроизоляции и кровель ответственных и капитальных сооружений.

## 14. ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Полимерными* материалами или *пластическими массами* называют материалы, которые полностью или частично состоят из органических высокомолекулярных соединений-полиров. К высокомолекулярным соединениям принято относить вещества, молекулярная масса которых превышает 5000, к низкомолекулярным – вещества с молекулярной массой менее 500. Соединения с промежуточными значениями молекулярной массы называют *олигомерами*. Улучшение технологических и технических свойств полимерных материалов, их технико-экономических показателей достигается введением наполнителей, пластификаторов, стабилизаторов, отвердителей, пигментов, антипиренов, порообразователей и других компонентов.

Полимерные материалы отличает ряд ценных свойств - сравнительно низкая плотность и теплопроводность, повышенные прочностные показатели, высокая химическая стойкость, хорошая сопротивляемость истирающим усилиям, способность легко и устойчиво окрашиваться и др. Полимерные материалы характеризуются высокой технологичностью, т.е. способностью перерабатываться в изделия с помощью разнообразных технологий с высоким уровнем механизации и автоматизации.

Объективная оценка пластических масс как строительных материалов требует учета и их негативных особенностей. Такими особенностями пластмасс в определенных эксплуатационных условиях могут быть низкая теплостойкость, высокий коэффициент термического расширения, повышенная ползучесть, неогнестойкость, способность к деструкции под воздействием различных факторов окружающей среды, возможность эмиссии токсичных веществ.

Полимерные строительные материалы классифицируют по ряду признаков: виду полимера (поливинилхлоридные, полиэтиленовые, полипропиленовые и т.д.), способу производства (экструзионные, литьевые, каландровые и т.д.), физическому состоянию (жесткие, мягкие, эластичные), назначению (кровельные, гидроизоляционные, теплоизоляционные, для полов и др.).

### 14.1. Синтетические полимеры

Основным компонентом пластмасс являются синтетические полимеры. Слово *полимер* происходит от греческого слова *polimeres* – составленный из многих частей. Молекула полимера состоит из большого числа атомных группировок, которые имеют одинаковое строение и соединены между собой ковалентными связями. Такие группировки называются *элементарными звеньями* или *структурными единицами*.

Число звеньев в цепных макромолекулах полимеров ( $n$ ) называется степенью полимеризации. Произведение степени полимеризации на молекулярную массу звена определяет молекулярную массу полимеров.

Молекулярная масса полимеров может изменяться в широком диапазоне и достигать миллионов атомных единиц массы. В зависимости от степени полимеризации из одного и того же мономера можно получить вещества с различными свойствами. Так полиэтилен с короткой цепочкой ( $n=20$ ) является жидкостью, имеющей смазочные свойства. Полиэтилен с длиной цепи в 1500-2000 звеньев представляет собой твердый, гибкий пластический материал, из которого можно изготавливать пленку, эластичные трубы и тому подобное. Полиэтилен с длиной цепи в 5000-6000 звеньев представляет собой тоже твердый, но более жесткий материал.

Основная масса полимеров представлена органическими соединениями, которые содержат в цепных макромолекулах атомы углерода, водорода, кислорода, азота, серы и галогенов.

К элементоорганическим полимерам относятся соединения, макромолекулы которых включают дополнительно атомы элементов, характерных для неорганических веществ – кремния, алюминия, титана, олова и др.

В зависимости от поведения при нагревании различают термопластичные и термореактивные полимеры.

Термопластичные полимеры (*термопласты*) способны обратимо изменяться при многократном нагревании и охлаждении – размягчаться и отвердевать, приобретать пластичность и возвращаться в жесткое состояние, плавиться и затвердеть без изменения основных



свойств. Представителями этого типа полимеров являются полиэтилен, поливинилхлорид, полистирол.

Термореактивные полимеры (*реактопласты*) при нагревании превращаются необратимо в твердые неплавкие и нерастворимые продукты. К числу термореактивных относятся карбамидо- и фенолформальдегидные, полиэфирные полимеры и др.

Все многообразие высокомолекулярных веществ включает природные и синтетические полимеры. Для строительства в настоящее время наибольшее значение как вяжущие (связующие) вещества, используемые в различных композиционных материалах – пластмассах, полимерных бетонах, растворах и мастиках – имеют синтетические полимеры, получаемые химическим синтезом из низкомолекулярных веществ (*мономеров*).

Производство синтетических полимеров началось в 1907 г, когда американский химик Л. Бакеланд запатентовал т.н. бакелитовую смолу – продукт конденсации фенола и формальдегида, превращающийся при нагревании в полимер с трехмерной пространственной структурой. В 1910 г. русский ученый С.В. Лебедев получил первый синтетический бутадиеновый каучук. Накануне Второй мировой войны в ряде стран было освоено промышленное производство полиэтилена, полистирола, поливинилхлорида, полиметилметакрилата (органического стекла).

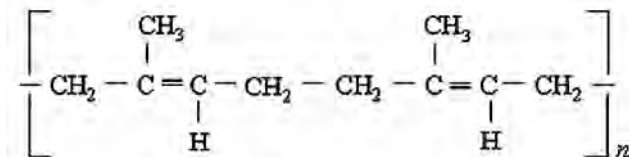
В настоящее время производство синтетических полимеров относится к крупномасштабным интенсивно развиваемым отраслям промышленного производства.

**Структура и свойства полимеров.** Структура полимеров определяется строением макромолекул и характером их взаимной укладки (надмолекулярная структура).

Главная особенность строения полимерных соединений - наличие цепных молекул, в которых последовательно связано большое число атомов (рис. 14.1). Атомы в цепях соединяются между собой прочными химическими связями длиной  $1...1,5 \cdot 10^{-10}$  м. Между цепями действуют значительно более слабые межмолекулярные силы на расстояниях порядка  $3...4 \cdot 10^{-10}$  м. В сетчатых (пространственных) полимерах между цепями имеются химические связи.

В зависимости от характера расположения звеньев цепей различают регулярные и нерегулярные полимеры (рис. 14.2). Для первых характерно монотонное чередование звеньев, определенный поряд-

док их расположения в пространстве (стеререгулярность). В качестве примера структуры *стеререгулярных* полимеров ниже приведена структура натурального каучука:



Макромолекулы полимеров могут быть построены из мономеров, одинаковых и различных по химическому строению (*гомополимеры* и *сополимеры*).

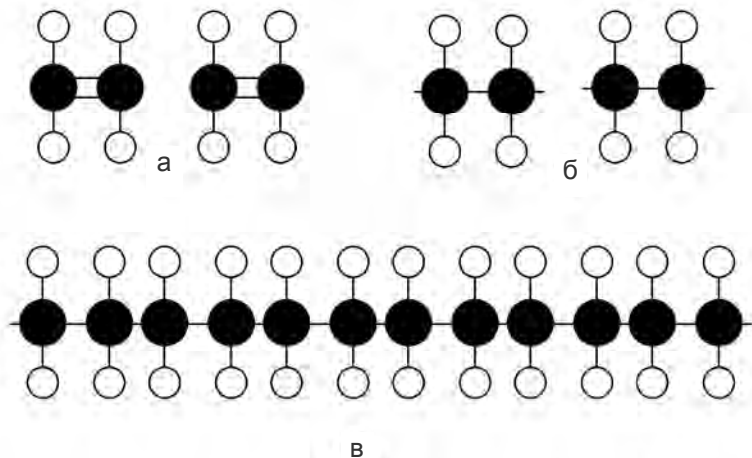


**Рис. 14.1.** Структурная схема образования молекулы полиэтилена:

а – молекула этилена; б – мономер полиэтилена;  
в – молекула полиэтилена

В зависимости от особенностей строения цепей различают линейные, разветвленные и сетчатые или пространственные полимеры (рис. 14.3). В макромолекулах разветвленных полимеров наряду с главной цепью имеются ответвления (боковые цепи). Сетчатые полимеры построены из цепей, соединенных друг с другом в трехмерную сетку.

Если главные цепи полимеров построены из одинаковых атомов, например, атомов углерода, серы, фосфора и т.п. их называют *гомо-*

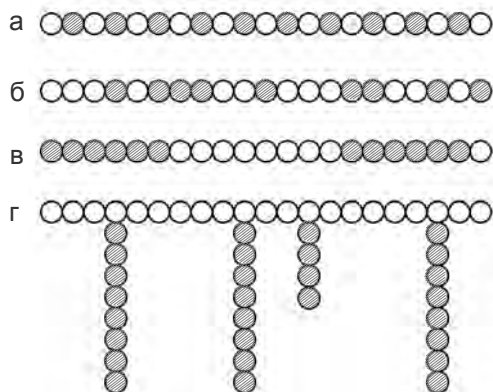


**Рис. 14.2.** Способы соединения различных мономерных группировок в макромолекулах сополимеров: а – регулярный сополимер; б – нерегулярный сополимер; в – блоксополимер; г – привитый сополимер

трехмерного порядка, как в расположении цепей, так и в расположении отдельных звеньев (рис. 14.4). В этом случае строение упорядоченных участков можно

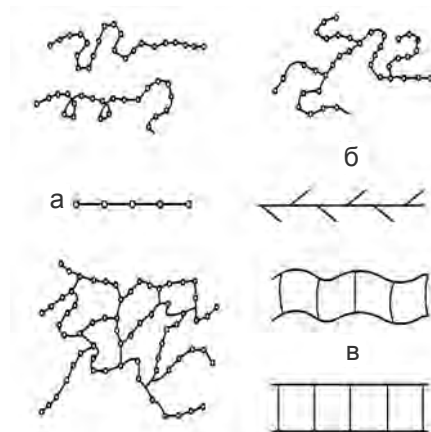


**Рис. 14.3.** Схемы различных видов полимеров: а – линейные; б – разветвленные; в – пространственные

цепными. Из гомоцепных наиболее распространены карбоцепные полимеры, главные цепи макромолекул которых построены из атомов углерода. Гетероцепные полимеры имеют главные цепи, состоящие из различных атомов.

Полимеры могут находиться в жидком или твердом состоянии. Твердому агрегатному состоянию соответствуют кристаллическое или аморфное фазовое состояние.

Кристаллическая структура полимера создается при наличии дальнего упорядоченных участков можно характеризовать параметрами элементарной ячейки так же как для низкомолекулярных кристаллов.

При кристаллизации полимеров возникает большое разнообразие надмолекулярных структур. Наиболее характерно возникновение в полимерном расплаве мелкокристаллической или сферолитной структуры (рис. 14.5).

Общая степень кристалличности в различных полимерах колеблется от 10 до

90%. Эта характеристика имеет существенное значение для полимеров, так как влияет на технологические параметры переработки их в изделия.

Способность полимеров к кристаллизации зависит от их химического строения, энергии межмолекулярного взаимодействия, регулярности и гибкости цепей и других факторов. Кристаллизоваться могут только полимеры с достаточно гибкими цепями в определенном интервале температур.

Для аморфной структуры полимеров характерно отсутствие упорядоченности при проявлении ее только для близко расположенных макромолекул. В зависимости от температуры аморфные полимеры могут находиться в стеклообразном, высокоэластичном и вязкотекучем состоянии.

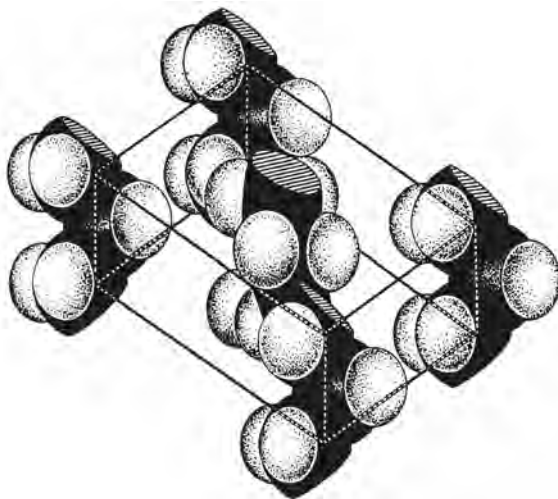


**Рис. 14.4.** Расположение участков макромолекул полиэтилена в элементарной ячейке кристалла

В *стеклообразном* состоянии в молекулах полимера колеблются только атомы, входящие в состав цепи. *Высокоэластичное* состояние характеризуется колебательным движением звеньев (крутильные колебания), вследствие которого цепь полимера приобретает способность изгибаться. При *вязкотекучем* состоянии макромолекулы полимера целиком приходят в движение.

При нагревании аморфный полимер последовательно переходит из стеклообразного в высокоэластическое, а затем в вязкотекучее состояние, при охлаждении все три состояния проходятся полимером в обратном порядке (рис. 14.6). Средняя температура перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние называется *температурой стеклования*  $T_g$ , из высокоэластического в вязкотекучее состояние – *температурой текучести*  $T_f$ . Стеклообразный полимер можно охладить до такой температуры, когда он

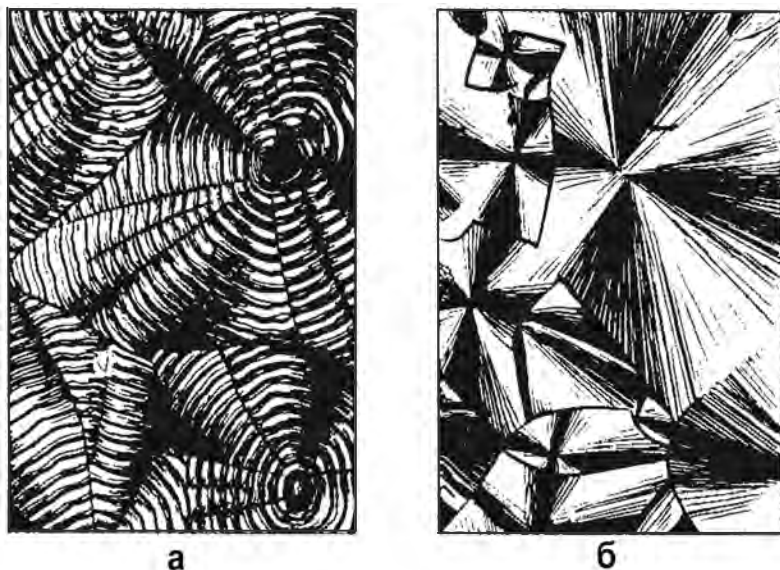


**Рис. 14.5.** Различные типы сферолитов:  
а – кольцевой; б – радиальный

будет легко разбиваться при ударе. Такая температура носит название *температуры хрупкости*  $T_{хр}$ .

Каждое физическое состояние полимера имеет определенное значение для его переработки или применения. Полимеры, находящиеся при обычной температуре в стеклообразном состоянии или в незначительной степени закристаллизованные, являются жесткими материалами (*пластики*). Для пластических масс температура стеклования должна на 60-80°C превышать температуру эксплуатации. Полимеры, находящиеся в высокоэластичном состоянии, – *эластомеры* – обычно применяются для получения резиновых изделий.

При вязкотекучем состоянии полимеры можно перерабатывать в изделия.

Основными факторами структуры полимеров, влияющими на их свойства, являются длина макромолекулярной цепи, характеризующая молекулярной массой и степенью полимеризации, особенности химического строения мономерной единицы, ее размещение в цепи, полидисперсность, стереорегулярность, степень "сшивания" и др. Молекулярная масса полимеров в значительной мере определяет их механические свойства (прочность при разрыве, эластичность, температурный предел текучести, усталостную прочность и др.) (рис. 14.7). С увеличением степени полимеризации прочность материала сначала повышается, а затем при  $n \approx 600$  приобретает постоянное значение.

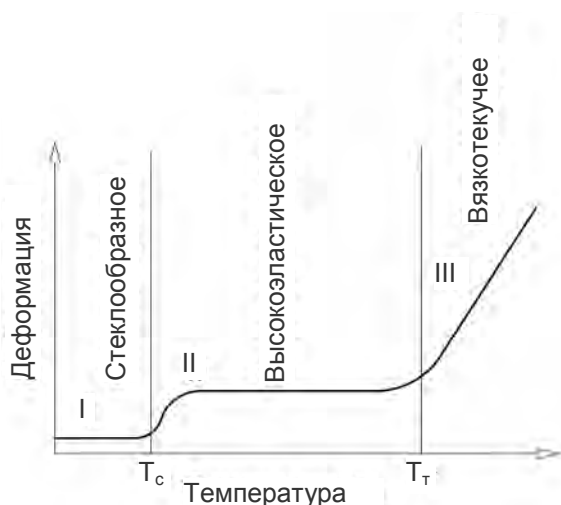


**Рис. 14.6.** Термомеханическая кривая полимера

меры состоят из смеси макромолекул, отличающихся по массе и размерам, и для них учитывают обычно среднюю молекулярную массу.

Благодаря значительной длине при небольших поперечных размерах линейные молекулы способны изгибаться. Гибкость проявляется в том, что отдельные участки макромолекул могут поворачиваться по отношению к другим участкам вокруг связей, являющих-

С увеличением молекулярной массы повышается температура плавления, уменьшается растворимость, повышается вязкость растворов, увеличивается эластичность и прочность полимеров, а иногда повышается их жесткость. Понятие молекулярной массы для полимеров по сравнению с низкомолекулярными соединениями усложняется их полидисперсностью. Поли-

ся осями вращения. Средняя величина участка, совершающего движения, называется сегментом и является мерой гибкости макромолекул. В результате движения сегментов макромолекулы принимают различные формы, называемые *конформациями*.

Переход макромолекул из одной конформации в другую происходит при достаточно интенсивном тепловом воздействии. Способность отдельных молекул и их сегментов к взаимному перемещению обуславливает ползучесть полимерных материалов, повышенную температурную деформативность и усадку при отверждении. Обратимое изменение формы гибких молекул под влиянием механических воздействий определяет *эластичность* полимеров.

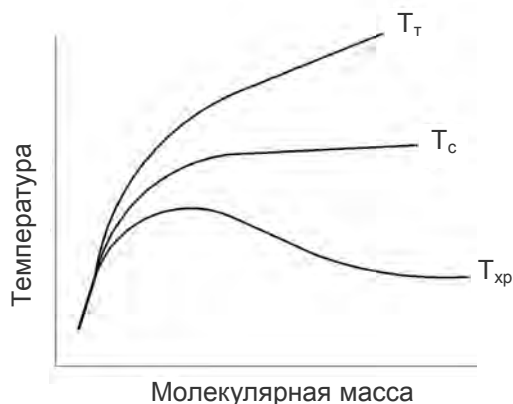


**Рис. 14.7.** Зависимость температуры текучести ( $T_T$ ), стеклования ( $T_C$ ), хрупкости ( $T_{Хр}$ ) от молекулярной массы полимера

Подвижность макромолекул можно уменьшить понижением температуры или образованием сетчатой структуры. Чем гуще “сетка”, тем меньше текучесть и выше прочность материала. Такую структуру можно образовать пространственной “сшивкой” молекул при воздействии на формовочные массы давления и температуры. Даже скручивание цепей под влиянием внешних воздействий значительно уменьшает их перемещаемость

друг относительно друга, что сказывается особенно при кратковременных напряжениях.

В соответствии с молекулярно-кинетическими представлениями о механизме разрушения полимеров повышение температуры сопровождается увеличением кинетической энергии звеньев цепных молекул и уменьшением числа межмолекулярных связей, несущих нагрузку.

Большое влияние на механические свойства полимера оказывают размеры и форма надмолекулярных структур. Так, например, при разной длительности прогрева полипропилена получают образцы, имеющие сферолиты разных размеров. Образцы с малыми сферолитами обладают более высокой прочностью и имеют хорошие эластические свойства. Увеличение размера сферолитов приводит к повышению хрупкости и снижению прочности. Являются хрупкими и разрушаются при ударе полимеры с глобулярной структурой.

Одним из распространенных способов упрочнения полимерных материалов является ориентация цепей и надмолекулярных структур. Таким способом может являться вытяжка материала в процессе его переработки. В ориентированных полимерах увеличивается межмолекулярное взаимодействие и для разрушения требуется разрыв большого числа химических связей. Ориентированные полимеры обладают анизотропией механических свойств. В отличие от прочности относительное удлинение при разрыве ориентированного образца в направлении ориентации всегда меньше чем в перпендикулярном направлении. Это объясняется меньшей гибкостью предварительно распрямленных цепей.

Структура полимеров активно влияет на их химическую и термическую стойкость. В отличие от полимеров с углеводородными цепями гетероцепные полимеры неустойчивы к действию кислот и щелочей, они могут разрушаться даже водой при повышенной температуре. Нестойки к окисляющим кислотам и к щелочам полимеры с разветвленной структурой (полиэфиры, фурановые смолы). У разветвленных полимеров связи между боковыми цепями и главной цепью менее прочны, чем связи в главной цепи. Поэтому разветвленные полимеры всегда менее термостойки, чем неразветвленные.

**Способы получения полимеров.** Сырьем для получения синтетических полимеров служат, в основном, природный газ, а также продукты нефтяного происхождения и углерепереработки (продукты коксования и газификации каменного угля).

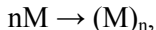
В зависимости от типа химических реакций, лежащих в основе получения синтетических полимеров, их разделяют на полимеризационные и поликонденсационные.

*Полимеризацией* называют процесс соединения молекул исходных низкомолекулярных веществ – мономеров с образованием вы-



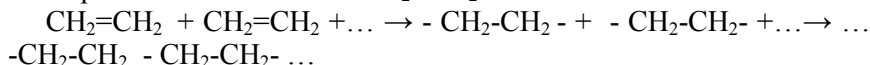
сокомолекулярных веществ, не сопровождающийся выделением побочных продуктов.

Общая схема реакции полимеризации:

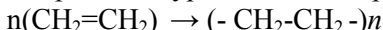


где  $M$  – молекула мономера;  $M_n$  – макромолекула, состоящая из  $n$  мономерных звеньев;  $n$  – степень полимеризации.

В качестве мономеров, вступающих в реакцию полимеризации, обычно служат соединения с кратными связями (двойными, тройными) или соединения, имеющие циклическое строение. Например, реакция образования полиэтилена осуществляется в результате размыкания двойных связей ненасыщенного углеводорода – этилена  $CH_2=CH_2$  с последующим объединением образованных звеньев  $-CH_2-CH_2-$ :



Сокращенно уравнение этой реакции записывается так:



Реакции полимеризации начинаются с возбуждения мономеров и образования активных центров. Различают радикальную и ионную полимеризацию. В первой активными центрами служат свободные радикалы, т.е. мономеры, имеющие свободные ненасыщенные связи, во второй – ионы.

В зависимости от способа образования свободных радикалов, (в реакции синтеза полиэтилена, например, это –  $CH_2-CH_2-$ ), полимеризация может быть термической, фотохимической, радиационной, химически инициированной. Последняя наиболее распространена и происходит под действием химических соединений – *инициаторов*. К таким соединениям, количество которых при полимеризации составляет обычно 0,1-1% от массы мономеров, обычно относятся, например, перекиси, гидроперекиси различных веществ, азо- и диазосоединения. Эти соединения легко распадаются с образованием свободных радикалов.

При ионной полимеризации применяют специальные катализаторы, способствующие образованию активных центров в виде катионов или анионов.

На практике обычно используют полимеризацию в газовой фазе, блоке, в растворе, эмульсии или суспензии. Полимеризации в газовой фазе подвергаются газообразные мономеры, например, этилен.

#### 14. Полимерные материалы

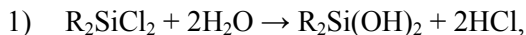
Реакция проводится под высоким давлением, в присутствии инициаторов. Полимеризацию в блоке проводят в массе мономера, не используя растворители, а полимер, образуется в виде твердого блока или расплава. Полимеризация в растворе может производиться при использовании растворителей, растворяющих как мономер, так и полимер или растворяющих лишь мономер. В первом случае полимер образуется в виде раствора, во втором выпадает в осадок и отфильтровывается.

Эмульсионная и суспензионная полимеризация являются наиболее распространенными способами получения полимеров. Мономер диспергируют в воде с добавкой инициаторов и эмульгаторов.

Полимеризация – один из основных методов синтеза полимеров. С ее помощью осуществляют получение полимеров, имеющих широкое применение для получения строительных изделий – полиэтилена, полистирола, поливинилхлорида, полиакрилатов и др.

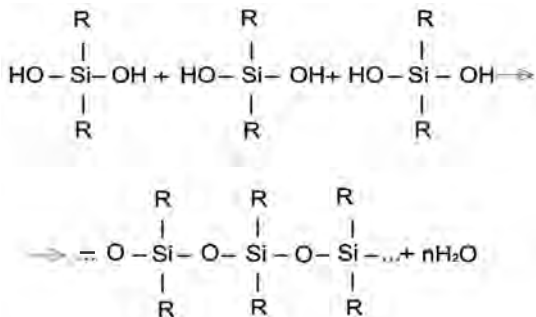
*Поликонденсацией* называется процесс образования полимера, сопровождающийся одновременным выделением какого-либо низкомолекулярного вещества (воды, аммиака, галоидоводорода и др.). При реакции поликонденсации в отличие от полимеризации состав исходного мономера не будет соответствовать составу элементарного звена полимера.

Например, при получении кремнийорганических полимеров (полиорганосилоксанов) исходные вещества – алкилхлорсиланы  $R_nSiCl_m$  подвергаются гидролизу, а продукты гидролиза – поликонденсации. Ниже приводится одна из возможных схем процесса:



где R – углеводородная группа атомов

2)



Поликонденсация может осуществляться в расплаве, растворе, эмульсии, суспензии, твердой фазе, как в присутствии, так и без катализаторов. Наиболее распространены первые два способа поликонденсации. Поликонденсацией в расплаве получают полимеры с температурой плавления до 300°C (полиэфир, полиамиды и др.). Поликонденсацию в растворе применяют, когда исходные компоненты и образующийся полимер неустойчивы при температуре плавления. Как правило, продукты поликонденсации (поликонденсаты) имеют меньшую молекулярную массу в сравнении с продуктами полимеризации.

Из поликонденсационных полимеров для получения строительных изделий применяют в основном феноло- и аминокальдегидные, полиэфирные, фурановые, эпоксидные и кремнийорганические полимеры.

**Основные виды синтетических полимеров.** К числу основных полимеризационных полимеров, используемых в производстве строительных материалов, относятся: полиэтилен, полипропилен, полиизобутилен, полистирол, поливинилхлорид, поливинилацетат, полиакрилаты и иден-кумароновые полимеры.

*Полиэтилен* – полимер этилена  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$  – бесцветного газа, получаемого термическим разложением углеводородов (зачастую смеси этана и пропана) при температуре 800°C или пиролизом жидкого нефтяного сырья.

Существует три метода полимеризации этилена: при высоком, низком и среднем давлении. Макромолекулы нормального линейного строения получают при низком давлении, при высоком они имеют менее регулярное строение, что влияет на степень кристалличности, плотность, температуру плавления, твердость и пр. Полиэтилен, полученный при низком и среднем давлении, отличается большей плотностью, прочностью, жесткостью и повышенной теплостойкостью. Полиэтилен высокого давления является более мягким и эластичным материалом.

Метод полимеризации этилена при высоком давлении (110-150 МПа) и повышенной температуре (180-250°C) с использованием кислорода как инициатора процесса полимеризации является основным в производстве полиэтилена с низкой плотностью ( $\rho=910-939 \text{ кг/м}^3$ ) и молекулярной массой 10000-45000 (рис.14.8).

При продолжительном действии статических нагрузок полиэтилен деформируется. Изделия из полиэтилена, длительное время находящиеся в напряженном состоянии, могут растрескиваться. С увеличением молекулярной массы, уменьшением степени кристалличности и полидисперсности устойчивость к растрескиванию полиэтилена возрастает.

В зависимости от свойств и назначения полиэтилен выпускают различных марок. Показатели основных физико-механических свойств полиэтилена высокого, среднего и низкого давления приведены в табл. 14.1.

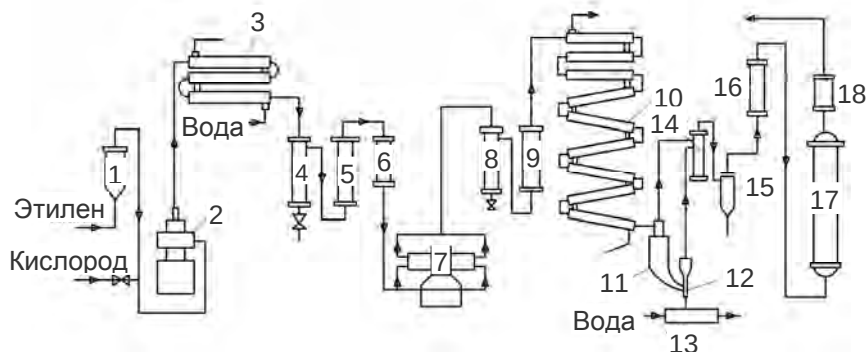


**Рис. 14.8.** Схема получения полиэтилена непрерывным методом при высоком давлении:

1, 6, 9, 16, 18 – фильтры; 2 – компрессор на 35 МПа; 3 – водяной холодильник; 4, 8 – маслоотделитель; 5 – буферная емкость; 7 – компрессор на 15 МПа; 10 – реактор; 11 – газоотделитель; 12 – шнековый приемник; 13 – ванна для полиэтилена; 14 – фильтр-ловушка; 15 – циклон; 17 – скруббер

С повышением плотности полиэтилена его температура плавления увеличивается. Изделия из полиэтилена низкой плотности могут эксплуатироваться при температурах до 60°C, а из полиэтилена высокой плотности – до 100°C. Полиэтилен становится хрупким только при -70°C, поэтому изделия из него могут использоваться в суровых климатических условиях. Для полиэтиленовых изделий характерны высокая водостойкость, хорошие диэлектрические свойства. При комнатной температуре полиэтилен практически не растворяется ни в одном из орга-

нических растворителей. При температурах выше 70-80°C он набухает и растворяется в бензоле и хлорированных углеводородах. Полиэтилену присущи высокая химическая прочность и биологическая инертность. К недостаткам полиэтилена следует отнести низкие теплостойкость и твердость, горючесть и слабую адгезию к минеральным материалам, способность к старению. С целью защиты от старения в полиэтилен вводят наполнители и стабилизаторы.

Таблица 14.1

Основные физико-механические свойства полиэтилена

| Свойства                                                                    | Показатель свойств для разновидностей полиэтилена |                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                                                                             | высокого давления (ПЭВД)                          | низкого (ПЭНД) и среднего (ПЭСД) давления |
| Предел прочности, МПа:<br>на растяжение<br>при изгибе                       | 10-17<br>12-17                                    | 22-32<br>20-39                            |
| Относительное удлинение при разрыве, %                                      | 500-600                                           | 300-800                                   |
| Модуль упругости на растяжение, МПа                                         | 147-245                                           | 540-980                                   |
| Твердость по Бринеллю, МПа                                                  | 14-24                                             | 44-64                                     |
| Теплопроводность, Вт/м·°C                                                   | 0,29                                              | 0,42                                      |
| Термический коэффициент линейного расширения в интервалах 0...100 °C, 1/°C. | $(2,2...5,5) \cdot 10^{-4}$                       | $(1...6) \cdot 10^{-4}$                   |

Полиэтилен низкой плотности (ПЭВД) используют для изготовления гидроизоляционных пленок и плит, труб и арматуры к ним, профилей и пр. Полиэтилен высокой плотности (ПЭНД) и (ПЭСД) используют для изготовления высокопрочных изделий. Это профили, блоки, листы, пленки, полученные методом раздува; технические изделия, изготавливаемые методами экструзии, выдуванием или литьем под давлением.

*Полипропилен*  $[-\text{CH}_3\text{CH}-\text{CH}_2-]_n$  получают полимеризацией газа пропилена  $\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}_2$ , выделяемого из продуктов крекинга нефти или из других нефтепродуктов.

Полипропилен имеет более высокую теплостойкость, чем полиэтилен низкой и высокой плотности. Термический коэффициент линейного расширения в интервале температур 30-120°C для него ниже, чем для полиэтилена высокого давления. Полипропилен в меньшей мере, чем полиэтилен растрескивается под действием агрессивных сред. Одним из важных недостатков этого полимера является невысокая морозостойкость (-30°C), в этом отношении он уступает полиэтилену.

Основные свойства полипропилена приведены ниже:

|                                      |          |
|--------------------------------------|----------|
| Плотность, г/см <sup>3</sup>         | 0,9-0,91 |
| Температура плавления, °C            | 164-174  |
| Предел прочности при растяжении, МПа | 25-40    |
| Относительное удлинение, %           | 200-800  |

Из полипропилена изготавливают трубы, пленку, листы, вентиляционные решетки и санитарно - техническое оборудование.

*Полиизобутилен*  $[-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)_2-]_n$  является продуктом полимеризации изобутилена  $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)_2$  – газа, получаемого пиролизом бутан-бутиленовых фракций, являющихся побочными продуктами крекинга нефти, или путем дегидратации изобутилового спирта. Он представляет собой эластичный каучукоподобный материал или жидкость белого или светло-серого цвета. В отличие от каучуков полиизобутилен не способен к реакции вулканизации (“сшиванию” макромолекул), поскольку его молекулярные цепи являются насыщенными.

Полиизобутилен имеет ряд ценных свойств, он стоек к агрессивным средам и устойчив даже к действию "царской водки". При нормальной температуре на него не действуют низшие спирты, кетоны, сложные эфиры и прочие полярные растворители. Тем не менее, он сравнительно легко растворяется в нефтяных ароматических углеводородах и минеральных маслах, набухает в жирах и растительных маслах.

Положительной особенностью полиизобутилена является его способность воспринимать различные наполнители в значительном количестве – до 90%. Введение активных наполнителей (сажа, гра-

фит, тальк) увеличивает прочность и жесткость композиций, уменьшает их текучесть.

В строительстве полиизобутилен используют для изготовления рулонных и листовых гидроизоляционных материалов, герметиков, клеев, кислотостойких замазок, в качестве материала для защитных покрытий путем распыления. Используют его также как антикоррозийный материал при строительстве химических предприятий в виде футеровочных листов.

*Полистирол*  $[-C_6H_5CH-CH_2-]_n$  является полимером стирола  $C_6H_5CH=CH_2$  – бесцветной жидкости, нерастворимой в воде, которую получают каталитическим дегидрированием этилбензола.

При обычной температуре полистирол имеет вид твердого упругого тела, при 80-90°C начинает проявлять эластичность.

Основным методом переработки является литье под давлением при температуре 180-220°C. Используются также методы экструзии и прессования.

Основные строительные материалы из полистирола и его сополимеров, – это плитки и листы для облицовки стен, теплозвукоизоляционные пенопласты, вентиляционные решетки, раковины, лакокрасочные материалы, эмали и прочие изделия.

*Поливинилхлорид*  $[-CH_2-CHCl-]_n$  – полимер винилхлорида  $CH_2=CHCl$ , получаемого гидрохлорированием ацетилена или пиролизом дихлорэтана. Свойства поливинилхлорида (табл. 14.2) можно изменять в широких пределах путем введения различных добавок (пластификаторов, наполнителей и пр.), а также химического модифицирования.

Таблица 14.2

Основные свойства поливинилхлорида

| Свойства                                                     | Показатели свойств для    |                       |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
|                                                              | винилпласта               | пластиката            |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>                                 | 1,35-1,43                 | 1,18-1,30             |
| Прочность, МПа<br>при растяжении<br>при сжатии<br>при изгибе | 40-70<br>60-160<br>70-120 | 10-25<br>6-10<br>4-20 |
| Относительное удлинение, %                                   | 5-40                      | 20-44                 |
| Твердость по Бринеллю, МПа                                   | 110-160                   | -                     |
| Модуль упругости на растяжение, МПа                          | 2600-4000                 | 7-8                   |
| Теплопроводность, Вт/м·С                                     | 0,16-0,19                 | 0,12                  |

Поливинилхлорид используют как в непластифицированных жестких (винипласты) так и в мягких или пластифицированных (*пластики*) материалах и изделиях.

Основными недостатками поливинилхлорида являются невысокая устойчивость к воздействию тепла и света, резкое снижение прочности с повышением температуры, а также текучесть под влиянием длительно действующей нагрузки. Температурный предел эксплуатации полимера установлен до 60°C. Для расширения границ использования полимера при его получении вводят термостабилизаторы, для улучшения пластических и эластических свойств используют пластификаторы, повышающие морозостойкость.

В производстве строительных материалов поливинилхлорид используют для изготовления линолеумов, плиток для пола, плитусов, накладок для ступенек, поручней, труб, фитингов, отделочных и гидроизоляционных пленок, пенопластов, пустотных профилей, для получения лаков и красок, клеев, ковровых изделий. Хлорированием поливинилхлорида в среде растворителя изготавливают *перхлорвинил*, который легко растворяется во многих органических растворителях, ему присуща высокая адгезия к металлу. Перхлорвинил применяется в производстве лаков и красок, а также синтетических ковровых материалов. Перхлорвиниловые клеи используют для склеивания изделий из поливинилхлорида.

*Поливинилацетат*  $[-CH_2-CH(OCOCH_3)-]_n$  – полимер винилацетата, получаемого синтезом из ацетилена и уксусной кислоты.

В строительстве поливинилацетат используют обычно в виде водной дисперсии. Как эмульгаторы применяют мыла, поливиниловый спирт, метилцеллюлозу.

Поливинилацетатная дисперсия используется как связующее водноэмульсионных красок, полимерцементных и полимерных растворов и бетонов. Благодаря высоким адгезионным свойствам к большинству материалов поливинилацетат широко применяется для получения клеев и мастик, в производстве моющихся обоев.

*Полиакрилаты* – полимеры производных акриловой и метакриловой кислот: эфиров, амидов, нитрилов.

Наибольшее применение в строительстве приобрел полиметилметакрилат (органическое стекло).  $[-CH_2-C(CH_3)(COOCH_3)-]_n$ . Ценные свойства этого полимера – высокая прозрачность, бесцвет-



ность, свето- и атмосферостойкость, легкая окрашиваемость в разные цвета при введении красителей. Полиметилметакрилат хорошо растворяется в ацетоне, дихлорэтано и некоторых сложных эфирах, не растворяется в воде, спиртах, алифатических углеводородах, стойк к разбавленным кислотам и щелочам.

Полиметилметакрилат менее хрупкий, чем силикатное стекло, он пропускает 91-92% лучей видимой части спектра, не меньше 73% ультрафиолетовых лучей (оконное стекло только 0,6%) и большую часть инфракрасных лучей, имеет хорошие диэлектрические свойства, стойк к старению в природных условиях.

Эффективным направлением использования метилметакрилата является применение его для получения бетонополимерных изделий. В технологии цементных бетонов и растворов акрилаты выполняют функции эффективных суперпластификаторов.

*Полиуретаны* получают полимеризацией диизоцианатов с многоатомными спиртами, которые содержат уретановые группы  $[-N(R)-COO-]$ . Они характеризуются высокой прочностью и твердостью наряду с эластичностью, масло- и бензостойкостью, хорошей адгезией к значительному количеству материалов, радиационной стойкостью и особенно высоким сопротивлением к истиранию, по величинам которого они превышают большинство известных полимеров.

Варьирование видом исходных компонентов и их соотношением дает возможность на основе полиуретанов в качестве вяжущих веществ получать композиционные материалы широкого ассортимента.

*Инден-кумароновые* полимеры – это смесь продуктов полимеризации индена  $C_9H_8$  и кумарона  $C_8H_6O$  – бесцветных масляных жидкостей, которые содержатся в сыром бензоле, продуктах нефтепереработки и других видах сырья. Поскольку по свойствам они близки, и их тяжело разделить, то полимер получают обычно из их смеси.

Показатели механических свойств этих полимеров сравнительно низкие: предел прочности при сжатии – 2,0-2,5 МПа, при растяжении – 0,8-1,0 МПа.

Пластифицированные инден-кумароновые полимеры применяют для изготовления плиток пола (их называют асбестосмоляными или асбестокумароновыми). Объединяя полимеры с синтетическими

каучуками, изготавливают клеящие мастики для плиток и линолеума. Инден-кумароновые смолы используют также для изготовления лаков, красок, эмалей. Для улучшения клеящих свойств инден-кумароновые полимеры модифицируют полистиролом и полиэфирами.

К основным *поликонденсационным* полимерам относятся карбамидоформальдегидные, меламиноформальдегидные, фенолоальдегидные, полиуретановые, полиэфирные, эпоксидные и кремнийорганические полимеры.

*Карбамидоформальдегидные* полимеры – это продукты поликонденсации карбамида  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  и формальдегида  $\text{CH}_2\text{O}$ .

Карбамидоформальдегидные полимеры изготавливают в виде водных растворов и эмульсий, а также в виде порошка. Они бесцветны, их отличает высокая адгезия, в особенности к древесине. Полимеры отвердевают на холоде и при нагревании. Ускорителями холодного отверждения являются щавелевая, фталевая, фосфорная кислоты, кислые соли и эфиры.

Карбамидоформальдегидные полимеры трудно возгораются, стойки против ряда органических растворителей, их объединяют высокая теплостойкость и светостойкость. По механическим свойствам, водо- и кислотостойкости карбамидоформальдегидные полимеры уступают фенолоформальдегидным, но они дешевле. Полимеры холодного отверждения менее прочные и водостойкие чем горячего.

Карбамидоформальдегидные полимеры применяют при изготовлении пресс-материалов, слоистых пластиков, покрытий, клеев, древесностружечных плит и клееных строительных конструкций.

*Меламиноформальдегидные* полимеры – это продукты поликонденсации меламина  $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$  с формальдегидом  $\text{CH}_2\text{O}$ .

По техническим свойствам меламиноформальдегидные полимеры превосходят карбамидоформальдегидные. Они имеют большую твердость, прочность, теплостойкость, водо- и светостойкость, не подвергаются деструкции при нагревании до  $200^\circ\text{C}$ , не токсичны, хорошо совмещаются с другими полимерами. Смеси меламиноформальдегидных, фенолоформальдегидных и других полимеров совместно с древесным шпоном, стеклотканью и бумагой используют для изготовления облицовочных плит, стеклопластиков, фанеры.

Модифицированные меламиноформальдегидные полимеры широко используют (в виде раствора в бутиловом спирте, толуоле и пр.) в качестве лаков холодной и горячей сушки. В сочетании с нитроцеллюлозой их широко используют для получения антикоррозионных, эластичных нитролаков, стойких к высоким температурам, придающих изделиям блеск и цветостойкость. Ими покрывают мебель и различные столярные изделия.

*Фенолоальдегидные* полимеры получают реакцией поликонденсации фенола  $C_6H_5OH$  с альдегидами (формальдегидом  $CH_2O$ , фурфуролом  $C_5H_4O_2$ , лигнином и пр.).

При взаимодействии фенола с формальдегидом в зависимости от их мольного соотношения и характера катализатора образуется два типа полимеров: термопластичные (новолачные) (рис.14.9) и термореактивные (резольные). Новолачные и резольные состояния полимеров могут быть обратимыми.

*Новолачные* полимеры – это твердые продукты от светло- до темно-коричневого цвета, плотностью  $1200-1220 \text{ кг/м}^3$  и с температурой плавления  $100-120^\circ\text{C}$ . Новолаки не отвердевают при продолжительном хранении и при нагревании до  $200^\circ\text{C}$ . Для перевода их в неплавкое состояние вводят уротропин в количестве 10-15%. Новолачные полимеры хорошо растворяются в ацетоне, метиловом и этиловом спиртах, не растворяются в ароматических углеводородах. По тепло- и химической стойкости, некоторым другим свойствам новолачные полимеры близки к резолам и могут быть превращены в них обработкой 30-40%-ным раствором формальдегида, а также введением отвердителя – уротропина.

Новолачные фенолоформальдегидные полимеры применяют для получения пенопластов, изоляционных мастик, спиртовых лаков и политуры, а также как прессованные материалы и смеси с наполнителями для изготовления разнообразных изделий.

*Резольные* полимеры в затвердевшем состоянии характеризуются более высокими показателями водо- и химической стойкости, чем новолачные, их применяют в производстве бумажно- и деревослоистых пластиков, фанеры, текстолита, стеклопластиков, сотовых пластов, клеев, лаков и других изделий.

*Полиуретанами* называют продукты взаимодействия диизоцианатов с многоатомными, или двухатомными спиртами. Эти полимеры характеризуются высокими показателями механических свойств:

предел прочности при сжатии 80-85 МПа, при растяжении 50-60 МПа, ударная вязкость  $5 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>2</sup>.

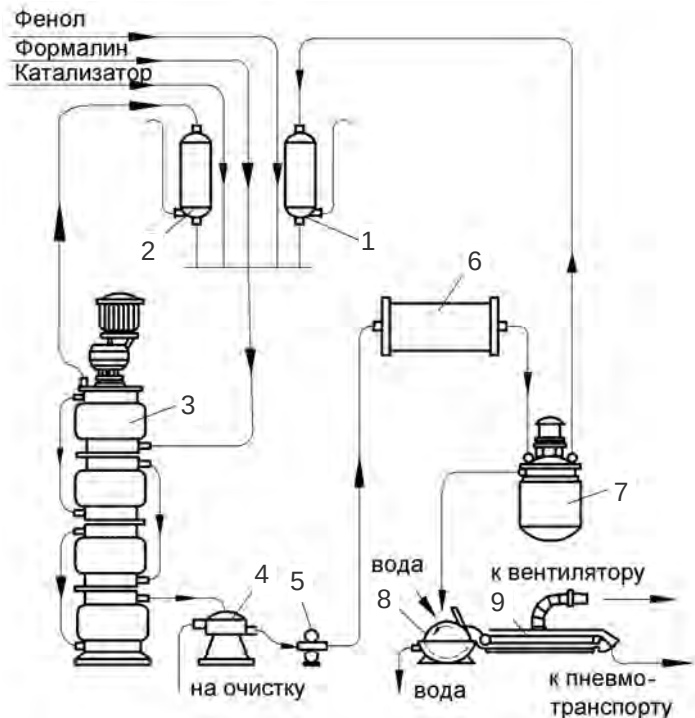


**Рис. 14.9.** Схема производства новолачных полимеров:  
1 – холодильник; 2 – обратный холодильник; 3 – колонна;  
4 – сепаратор; 5 – насос; 6 – сушильный аппарат; 7 – приемник; 8 – охлаждающий аппарат; 9 – ленточный конвейер

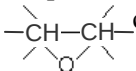
В производстве строительных материалов полиуретаны используют при изготовлении клеев, антикоррозионных лаков, изоляционных пленок, герметиков, теплозвукоизоляционных пенопластов.

*Полиэфиры* – полимеры, получаемые взаимодействием многоосновных кислот с многоатомными и ненасыщенными спиртами. Вместо некоторых кислот используют их ангидриды. В зависимости от используемых спиртов образуются насыщенные или ненасыщенные полиэфиры. Из насыщенных полиэфиров в строительстве наи-

более широкое применение получили алкидные полимеры, а из ненасыщенных – полиэфирмалеинаты и полиэфиракрилаты.

*Алкидные* полимеры получают при взаимодействии глицерина и этиленгликоля с фталевым ангидридом. Алкидные полимеры хрупкие, имеют ограниченную растворимость. Их модифицируют канифолью, которая придает им способность совмещаться с маслами и жирными кислотами и приобретать повышенную тепло- и атмосферостойкость. Алкидные полимеры выпускаются в виде растворов и используют в производстве линолеума, лаков, эмалей, клеев.

*Эпоксидные* полимеры – это вещества, образуемые при реакции различных органических соединений, которые содержат эпоксидную группу



с веществами, которые имеют подвижный атом

водорода (фенолами, спиртами, аминами). Незатвердевшие эпоксидные полимеры – это термопластичные токсичные продукты, твердые или в виде вязких жидкостей, они хорошо растворяются в различных органических растворителях, совместимы с карбамидо-, меламино-, фенолоформальдегидными и полиэфирными полимерами. Им присущи высокие показатели адгезионных свойств.

Процесс отверждения эпоксидных полимеров может происходить при нормальной или повышенной температуре. Для отверждения при нормальной температуре применяют обычно добавки аминов (полиэтиленполиамины, этилендиамины, гексаметилендиамины и т.п.), в количестве 5-10%. С повышением температуры до 80-100°C отверждение аминами ускоряется. Аминофенольный отвердитель дает возможность перевести эпоксидные полимеры в твердое состояние за 20 мин.

Для горячего отверждения (150°C) используют, в основном, ангидриды дикарбоновых кислот. Количество отвердителя составляет 30-40% массы полимера.

Свойства полимеров, отверждаемых с помощью ангидридов выше, чем при введении аминов (табл. 14.3).

Для снижения хрупкости эпоксидных полимеров их пластифицируют путем введения в смолы 15-20% дибутилфталата или других пластификаторов.

В качестве вяжущих разных строительных композитов (мастиков, клеев, стеклопластиков, полимербетонов) широкое применение по-

#### 14. Полимерные материалы

лучили эпоксидно-диановые олигомеры. Их марки ЭД-22, ЭД-20, ЭД-16, ЭД-14, ЭД-10, ЭД-8 установлены в зависимости от процентного содержания эпоксидных групп. Смолы марок ЭД-22, ЭД-20, ЭД-16 находятся в жидком состоянии, ЭД-14, ЭД-10, ЭД-8 – в твердом.

Таблица 14.3

Свойства эпоксидных полимеров

| Свойства                               | Показатели свойств при отверждении |                    |                    |
|----------------------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|
|                                        | малеиновым ангидридом              | метафенил диамином | диэтилен триамином |
| Прочность при изгибе, МПа              | 110-150                            | 100-115            | 80-110             |
| Относительное удлинение при разрыве, % | 2-3                                | 3-4                | 1-2                |
| Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>   | 15-18                              | 7-15               | 5-8                |
| Твердость по Бринеллю, МПа             | 120-150                            | 120-150            | 110-120            |
| Теплостойкость по Мартенсу, °С         | 100-120                            | 80-90              | 60                 |

Отвержденные эпоксидные полимеры отличаются от многих других полимеров более высокой прочностью (предел прочности при сжатии 100-130 МПа), водо- и химической стойкостью, адгезионной способностью.

*Кремнийорганические* полимеры (полиорганосилоксаны) получают реакцией поликонденсации двух групп исходных веществ: алкил (арил) хлорсиланов и замещенных эфиров ортокремниевой кислоты. Этот вид полимеров представлен эластичными или твердыми продуктами с плотностью 920-2000 кг/м<sup>3</sup>. Молекулы полиорганосилоксанов имеют спиралевидное строение. Им присуща высокая атмосферо-, водо- и теплостойкость. Материалы, изготовленные на их основе, стойки при температурах до 350-500°С.

Все кремнийорганические полимеры имеют небольшую механическую прочность, но характеризуются морозостойкостью, высокими диэлектрическими свойствами, устойчивостью к действию сла-

бых кислот и щелочей, органических растворителей, масел. Кремнийорганические полимеры хорошо растворяются в большинстве органических растворителей, совместимы с другими полимерами. Их используют в качестве гидрофобизаторов, для получения герметизирующих материалов, лаков, эмалей, высокотемпературных клеев, а также пенопластов с высокой термостойкостью.

## 14.2. Состав и свойства пластмасс

**Состав пластмасс.** Большинство пластмасс являются композиционными материалами, включающими кроме полимерного вяжущего порошкообразные или волокнистые *наполнители*. Наполнение полимеров позволяет в широком диапазоне изменять их технические свойства. Введение наполнителей позволяет также удешевлять пластмассы за счет существенного уменьшения расхода полимеров. В наполненных пластмассах полимеры служат связующими, они распределяются тонкими пленками, образуя оболочки из макромолекул, ориентированных в силовом поле наполнителя. Ориентированные пленки, толщина которых может составлять всего одну или несколько макромолекул имеют большую прочность, чем полимер в массе. Наибольший упрочняющий эффект достигается, когда наполнитель распределен в массе полимера на расстояниях, соизмеримых с размерами макромолекул.

В табл. 14.4 показано для примера упрочняющее действие различных наполнителей на фенопласты.

Значительное влияние на прочность наполненных пластмасс оказывает адгезия полимера к наполнителю. Силы адгезии, обусловленные как межмолекулярными так ионными и валентными связями, могут быть достаточно высокими, теоретическая прочность адгезионной связи достигает 300 МПа. Наличие микродефектов на поверхности контакта существенно ослабляет адгезионное взаимодействие.

Поверхность наполнителей ограничивает рост микротрещин, возникающих при усадке и нагружении полимеров. При приближении к поверхности наполнителя трещина прекращает свой рост благодаря ориентации макромолекул и улучшению условий релаксации напряжений.

Прочность фенопластов с различными наполнителями

| Вид фенопласта            | Вид наполнителя        | Содержание наполнителя, % | Средний предел прочности, МПа |            | Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup> |
|---------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------|--------------------------------------|
|                           |                        |                           | при растяжении                | при изгибе |                                      |
| Полимер без наполнителя   | —                      | —                         | 35                            | 75         | 1,2                                  |
| Фенопласт                 | Древесная мука         | 41                        | 40                            | 80         | 4,6                                  |
| Асбестовый пресс-материал | Асбестовое волокно     | 60                        | 35                            | 80         | 27                                   |
| Гетинакс                  | Бумага                 | 46                        | 75                            | 150        | 20                                   |
| Текстолит                 | Ткань хлопчатобумажная | 43                        | 100                           | 110        | 25                                   |
| Стеклотекстолит           | Стеклоткань            | 70                        | 280                           | 180        | 100                                  |
| СВАМ                      | Стеклошпон             | 74                        | 300                           | 190        | 120                                  |

Эффект усиления полимера наполнителем увеличивается с понижением вязкости расплава. Свободная энергия смачивания больше у олигомеров и мономеров чем у высокополимеров, что облегчает введение в них наполнителей. При этом переводя в тонкопленочное состояние мономеры и олигомеры, наполнители часто инициируют реакции полимеризации или поликонденсации. Плохой контакт частиц наполнителей с полимерами, имеющими высокую молекулярную массу, часто вынуждает ограничивать содержание наполнителей до 10-20%.

Кроме прочностных свойств, наполнители существенно изменяют твердость полимерных материалов, их стойкость к истирающим усилиям, влияют на реологические и термомеханические свойства полимерных смесей, уменьшают усадку (рис. 14.10). Переход при наполнении жидкой фазы в твердое аморфное состояние может сопровождаться резким уменьшением объема и появлением внутренних напряжений. Напряжения увеличиваются с повышением поверхностной энергии наполнителя, разности коэффициентов термического расширения полимера и наполнителя.



На результаты наполнения полимеров существенно влияет влажность наполнителя, который желательно подвергать сушке или прокаливанию. Вода, замещаемая полимером на поверхности зерен, мигрирует в массу полимера, понижая его плотность, увеличивая газо- и паропроницаемость. Свойства полимерных материалов зависят от формы и размеров зерен наполнителей, их удельной поверхности (рис. 14.11) и минерального состава. Например, прочность, модуль упругости и удлинение при разрыве резин линейно связаны с обратной величиной размера частиц наполнителя.

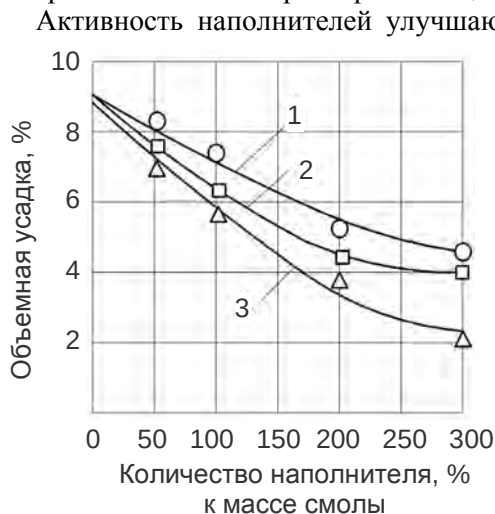


**Рис. 14.10.** Зависимость объемной усадки от количества и вида наполнителя: 1 – кварц; 2 – графит; 3 – андезит

ет 25°C, каолина и известняка – 15, талька и барита – 10°C.

В качестве наполнителей применяют порошкообразные, волокнистые или листовые минеральные или органические вещества. Наибольшее применение в технологии полимерных строительных материалов находят природные *порошкообразные* наполнители – мел, барит, каолин, тальк и др. Из органических материалов широко применяют как наполнители древесную муку, опилки.

С введением порошкообразных наполнителей в исходную сырьевую массу для ряда полимеров увеличивается степень по-

лимеризации. Некоторые порошки, такие как  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  изменяют скорость и глубину отверждения термореактивных полимеров, например фенолформальдегидных, кремнийорганических, полиэфиров.

Максимальные размеры частиц порошкообразных наполнителей не должны превышать, как правило, 40-50 мкм. При повышении дисперсности наполнителей многие виды полимерных материалов увеличивают свою прочность, упругость и твердость.

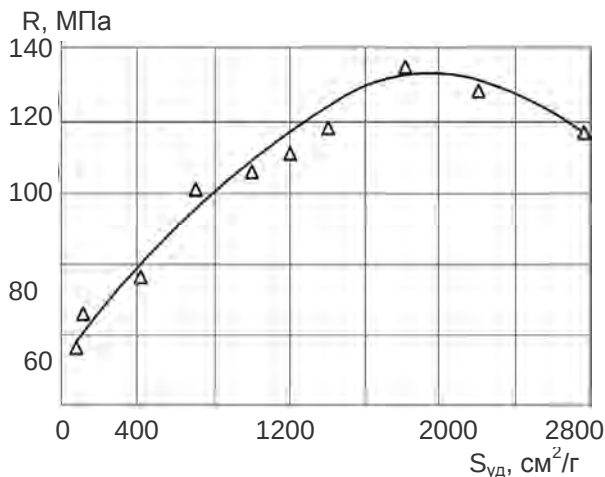


**Рис. 14.11.** Зависимость предела прочности эпоксидных мастик от удельной поверхности наполнителя

В качестве *волокнистых* наполнителей применяют асбест, целлюлозу, стекловолокно, синтетические волокна и др. *Листовыми* наполнителями являются бумага, ткани, стеклошпон, древесный шпон и др. Эти виды наполнителей оказывают армирующий эффект в полимерных материалах, повышая их прочность при растяжении, улучшая тепло- и звукоизоляционные свойства, ударную прочность и ряд других свойств.

Прочность армированных пластиков определяется расположением волокон и модулем упругости полимерного связующего. Наиболее высокая прочность достигается при применении высокоориентированных волокон, характеризующихся высокой адгезией к полимеру.

К основным компонентам значительной части пластмасс относятся *пластификаторы*. Они придают пластмассам эластичность, морозостойкость, повышают

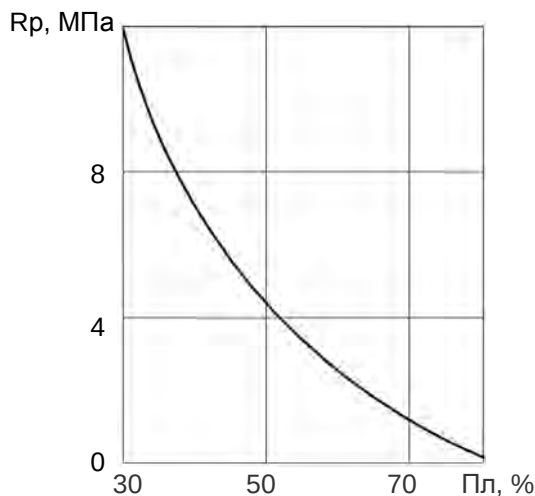


**Рис. 14.12.** Зависимость прочности поливинилхлорида при растяжении от содержания в нем дибутилфталата

сопротивление ударным нагрузкам, снижают усадочные деформации. Раздвигая макромолекулы полимера, молекулы пластификатора ослабляют энергию межмолекулярного воздействия. При повышенном содержании пластификатора возможно снижение прочности полимера (рис. 14.12). При введении пластификатора в полимер с гибкими макромолекулами сближаются температуры стеклования и текучести, а

по мере увеличения его содержания полимер переходит в раствор. Пластификаторы могут и не растворять полимер, а выполнять роль смазки, повышающей подвижность структурных элементов. В качестве пластификаторов полимеров наиболее часто применяют эфиры фталевой кислоты – фталаты. Часто используют также жидкие низкомолекулярные каучуки, канифоль, нефтяные масла, жирные кислоты, воски и др.

Для сохранения физико-механических свойств пластмасс в течение длительного срока службы в их состав вводят *стабилизаторы*. Стабилизаторы также способствуют устойчивости полимерных композиций к действию различных факторов при их переработке и хранении. Механизм действия стабилизаторов заключается в снижении скорости деструктивных химических процессов, происходящих в полимере и приводящих к его старению под действием окисления молекулярным кислородом, света, инициирующего влияния различных примесей и ряда других факторов. Для снижения скорости окисления вводят *антиоксиданты* – мелкодисперсные металлы,

оксиды переходных металлов и др. Светостабилизация полимеров достигается добавками, способными ингибировать реакции, в которых участвуют свободные радикалы, образующиеся в результате действия света. Количество стабилизаторов, вводимых в полимеры в процессе их изготовления не превышает 2-3% по массе.

Для устранения ряда недостатков полимеров на стадии их полимеризации или поликонденсации вводят добавки – *модификаторы*, например, хлор, кислоты, растительные масла, полиэферы, полиамиды и др. Взаимодействие основных и модифицирующих компонентов приводит к замене одних функциональных групп полимера другими без изменения структуры и длины цепи или включению блоков одного полимера в главную цепь другого. Например, введение бутилового спирта в реакционную массу при поликонденсации мочевиноформальдегидного полимера придает ему растворимость в органических растворителях, что весьма важно в технологии карбамидных лаков и красок. Эффективными способами модификации таких распространенных полимеров как полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид являются галогенизация, нитрация, сульфирование.

**Основные свойства пластмасс.** Свойства пластмасс зависят от химического и вещественного состава, вида и структуры полимерного связующего, степени наполнения и характеристики наполнителя, вида и содержания регулирующих добавок, технологии получения.

*Плотность* пластмасс колеблется в диапазоне 15...2200 кг/м<sup>3</sup>. Наименьшую плотность имеют пористые и ячеистые пластмассы. Пористая структура присуща *поропластам*, она представлена системой сообщающихся пор или полостей, ячеистая – *пенопластам*, она включает замкнутые ячейки, наполненные газом или смесью газов. Для получения материалов с ячеистой или пористой структурой смесь полимера и газообразователя прессуют при повышенной температуре и давлении с последующим вспениванием (прессовый метод); выдавливают через щель размягченный полимер, насыщенный под давлением газами (экструзионный метод); используют литье под давлением с вспениванием массы в форме; насыщают полимер под давлением газами или низкокипящей жидкостью с последующим вспениванием массы при снижении давления (автоклавный метод); вспенивают и спекают полимер-

ные гранулы, насыщенные легкокипящим газообразователем (беспрессовый метод).

Для наполненных пластмасс наибольшее влияние на плотность оказывают наполнители, составляющие, как правило, наиболее значительную часть их объема. Так, бумажно-слоистые пластики имеют плотность 1300-1400 кг/м<sup>3</sup>, полимербетоны с тяжелыми заполнителями 2200 кг/м<sup>3</sup> и более.

Пластмассы обычно легче многих природных и искусственных материалов. В среднем пластмассы в 2-3 раза легче алюминия и в 5-8 раз легче стали.

Для пластмасс характерна высокая *удельная прочность* или т.н. коэффициент конструктивного качества, измеряемый отношением предела прочности материала к его плотности. Этот показатель для плотных пластмасс находится в интервале 0,1-0,2 (при измерении прочности в МПа и плотности в кг/м<sup>3</sup>) т.е. примерно такой же, как у алюминиевых сплавов. В то же время для тяжелого бетона класса В15 этот показатель составляет примерно  $0,6 \cdot 10^{-2}$ , легкого бетона  $0,1 \cdot 10^{-1}$ , древесины сосны  $0,7 \cdot 10^{-1}$ .

Многие пластмассы имеют высокие значения как прочности при сжатии, так и прочности при растяжении и изгибе. При этом высокие показатели прочности на сжатие более присущи для пластмасс с дисперсным порошкообразным наполнителем. Например, для фенопластов, аминопластов, эпоксипластов предел прочности при сжатии составляет 120-160 МПа. Для пластмасс с волокнистыми и листовыми наполнителями прочность при растяжении и изгибе может быть выше прочности при сжатии (табл. 14.5).

Мерой сопротивляемости материалов удару является *ударная вязкость* – отношение энергии, затраченной на разрушение образца к площади его поперечного сечения. Для ряда пластмасс сопротивление удару характеризуется возможной высотой падения груза без разрушения материала. Практически не подвергаются ударному разрушению при обычных температурах эластичные пластмассы и резины. Из пластиков наиболее высокую ударную вязкость имеют волокнистые и слоистые материалы. Так у стеклопластиков ударная вязкость достигает до 150 кДж/м<sup>2</sup>. Высокую ударную вязкость (до 100 кДж/м<sup>2</sup>) имеют винипласт и фторопласты, низкую (до 0,4 кДж/м<sup>2</sup>) – высокопористые пластмассы (0,1-0,5 кДж/м<sup>2</sup>).

Основные физико-механические свойства стеклопластиков

| Вид стеклопластика         | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Предел прочности, МПа |            |            | Водопоглощение, % |
|----------------------------|------------------------------|-----------------------|------------|------------|-------------------|
|                            |                              | при растяжении        | при сжатии | при изгибе |                   |
| Полиэфирный листовой       | 1400                         | 60                    | 90         | 130        | 1,5               |
| Конструкционный КАСТ-В     | 1850                         | 230                   | 35         | 240        | 0,8               |
| Листовой стекловолокнистый | 1900...2000                  | 450                   | 400        | 700        | 0                 |
| В                          | 1700...1900                  | 80                    | 100        | 120        | 0,2               |
| С                          | 1700...1900                  | 500                   | 200        | 250        | 0,2               |

*Твердость* пластмасс значительно ниже, чем у большинства металлов и каменных материалов. Например, твердость (по Бринеллю) одного из наиболее твердых пластиков – асботекстолита равна всего 490 МПа, листового полиметилметакрилата – около 200, а целлюлозных материалов – 50. У стали показатель твердости может превышать 5000 МПа. Твердость пластических масс не находится в прямой зависимости от прочности, что характерно для металлов и ряда других материалов.

В отличие от других материалов, при пониженной твердости полимерные строительные материалы имеют низкую истираемость, что особенно ценно при использовании их для покрытия полов. Например, истираемость безосновного поливинилхлоридного линолеума 0,035-0,05, мастичных полов из поливинилацетатной эмульсии 0,02-0,03, кумароновых плиток для полов 0,08 г/см<sup>2</sup>. Истираемость наиболее твердых горных пород 0,01-0,1 г/см<sup>2</sup>.

При длительном действии механических напряжений полимерные материалы в большей мере, чем многие другие склонны к необратимым деформациям – *ползучести*. Если для стали модуль упругости составляет 2-2,2, алюминия – 1-1,2, стекла – 0,47-0,82, гранита – 0,24, то для ненаполненных пластмасс он находится в

интервале 0,001-0,045, стеклопластиков – 0,1-0,3 МПа ( $\times 10^5$ ). Величина модуля упругости зависит от характера и длительности нагрузки, температуры и относительной влажности воздуха. Введение наполнителей в состав полимерного материала снижает его ползучесть, а повышение температуры резко увеличивает.

Повышенная ползучесть ограничивает применение пластмасс в качестве конструкционных материалов. Помимо ползучести необходимо учитывать возможное набухание или усадку пластмасс при увлажнении и высыхании, уменьшение в объеме в результате миграции пластификаторов, растворителей и др. Следует принимать во внимание и обычно более высокую изменчивость свойств пластмасс, чем металлов, бетона, керамики.

Если пластмассы в процессе эксплуатации подвергаются растягивающим нагрузкам, показателем их *деформативности* служит величина относительного удлинения. Относительное удлинение полиэтиленовой, полиизобутиленовой и поливинилхлоридной пленок превышает соответственно 300, 200 и 150%, безрулонных кровельных покрытий на основе бутилкаучуков – 100%, пороизола – 20%.

В зависимости от комплекса вязкоупругих свойств пластмассы разделяют на жесткие, полужесткие, мягкие и эластичные.

*Жесткие* пластмассы имеют модуль упругости выше 1000 МПа. Для них характерны хрупкое разрушение, незначительное удлинение при разрыве, мгновенно обратимая деформация. Примерами жестких пластмасс служат фенопласты, аминопласты, глифталевые материалы.

*Полужесткие* пластмассы имеют модуль упругости больше 400 МПа, характеризуются сравнительно высоким относительным удлинением при разрыве. Остаточные деформации обратимы и полностью исчезают при нагревании пластмасс. Примерами служат полипропилен, полиамиды.

*Мягкие* пластмассы имеют модуль упругости 20-100 МПа, характеризуются высоким относительным удлинением при разрыве. Остаточные деформации обратимы и медленно исчезают при нормальной температуре. К мягким пластмассам относятся поливинилацетат, полиэтилен.

*Эластичные* пластмассы – мягкие, гибкие материалы, имеющие модуль упругости меньше 20 МПа, характеризуются боль-

шими обратимыми деформациями при растяжении. К этим материалам относятся каучуки, полиизобутилен.

Свойства пластмасс по отношению к воде зависят от особенностей их пористой структуры, вида и содержания наполнителя, степени гидрофильности. Пористость полимерных материалов колеблется от десятых долей процента (полимерные пленки, полиметилметакрилат, винипласт и др.) до 95% (ячеистые пластмассы).

Большинство полимерных материалов негигроскопично. Исключением являются древесностружечные и древесноволокнистые плиты и другие материалы, в состав которых входят преимущественно высокогидрофильные наполнители. Высокую *гигроскопичность* могут иметь и некоторые ненаполненные пористые материалы, например, поропласт на основе карбамидоформальдегидной смолы – мипора. За сутки ее гигроскопичность составляет около 15%, за 28 сут. – 85%.

Значительное поглощение воды для полимерных так же как и других материалов сопровождается увеличением их плотности и теплопроводности, снижением прочности, разбуханием. Так, разбухание древесностружечных плит при их выдерживании в воде 24 ч достигает 15-30%. Некоторое уменьшение *водопоглощения* изделий и повышение их водостойкости достигаются при введении в массу гидрофобизаторов, например, парафиновой эмульсии. Для плотных, гидрофобных пластмасс водопоглощение обычно составляет 0,1-0,5%, введение уже небольшого количества гидрофильных наполнителей увеличивает водопоглощение. Например, введение в поливинилхлоридную линолеумную пасту 20-30% талька увеличивает его водопоглощение за 24 ч до 1%. Для древесностружечных плит водопоглощение составляет 30-90%.

*Водонепроницаемость* пластмасс характеризуют тремя способами: 1) количеством воды, прошедшей в течение 1 ч через 1 м<sup>2</sup> площади испытуемого материала при заданном постоянном давлении; 2) длительностью выдерживания образца под давлением без появления признаков фильтрации; 3) максимально возможным давлением воды, при котором обеспечивается непроницаемость материала. В частности водонепроницаемость полиэтиленовых пленок характеризуют максимально допустимым коэффициентом водонепроницаемости –  $4 \cdot 10^{-7}$  л/см<sup>2</sup>·чПа. Для рулонного



гидроизоляционного материала на основе полиизобутилена (ГМП) водонепроницаемость определяют временем выдерживания образцов под давлением 0,6 МПа. Оно должно быть не менее 3 сут. Водонепроницаемость битумно-полимерных мастик должна быть не менее 1-0,8 МПа в течение 24 ч.

При использовании материалов для устройства пароизоляции строительных конструкций, герметизации стыков между панелями учитывается их *паро-* и *газопроницаемость*, т.е. количество пара или газа, которое проходит через 1 ч сквозь испытуемый образец толщиной 1 м площадью 1 м<sup>2</sup> при разности давлений на противоположных поверхностях 1 Па. Проницаемость неполярных полимерных материалов плотной структуры для паров полярных жидкостей весьма невелика, пары же неполярных веществ проходят сквозь них гораздо легче.

При эксплуатации полимерные материалы подвержены в той или иной мере тепловым воздействиям. *Теплостойкость* пластмасс характеризуют температурой, при которой начинается их плавление или деструкция, сопровождающаяся резким снижением прочности. Для пластмасс на основе термопластичных полимеров теплостойкость ниже, чем на основе термореактивных. Для первых она обычно не превышает 150°C, для вторых может достигать 250°, а для пластмасс на основе кремнийорганических полимеров 400°. Существенно влияют на теплостойкость вид и содержание наполнителей, стабилизаторы и другие добавки. При использовании пластмасс важно учитывать кроме теплостойкости предельную температуру, при которой возможна длительная эксплуатация материала. Наряду с максимальной важна и минимально допустимая температура эксплуатации пластмассы, ниже которой недопустимо возрастает ее хрупкость. Ниже приведен интервал температур эксплуатации некоторых строительных пластмасс (°C):

|                                     |             |
|-------------------------------------|-------------|
| листовой винипласт...               | - 10...+60  |
| пенополистирол...                   | -60...+70   |
| полипропилен...                     | -15...+100  |
| гернит...                           | -40...+70   |
| полиизобутиленовая пленка...        | -50...+100  |
| материалы из политетрафторэтилена.. | -269...+260 |
| полиорганосилоксаны...              | -60...+400  |

Скорость термической деструкции полимерных материалов при некоторых допущениях можно выразить уравнением Аррениуса:

$$K = ae^{-E/RT}, \quad (14.1)$$

где  $K$  – константа скорости реакции,  $\text{с}^{-1}$ ;  $a$  – коэффициент, зависящий от частоты колебаний молекул в тепловом процессе,  $\text{с}^{-1}$ ;  $E$  – энергия активации или средняя избыточная энергия молекул Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/град·моль;  $T$  – температура, °К.

Наряду с термической деструкцией полимеров снижению эксплуатационной стойкости пластмасс при нагревании способствуют напряжения, возникающие в результате высоких значений *температурного коэффициента линейного расширения* этих материалов в сочетании с их малой *теплопроводностью*. Температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha \cdot 10^{-6}$ : для стали – 9-12; полиэтиленовых пластмасс – 160-230; поливинилхлоридных – 80-90; фенолальдегидных – 10-30.

Большинство полимерных материалов являются хорошими диэлектриками, что позволяет их широко использовать для изоляции электрических проводов и кабелей, изготовления электроаппаратуры и специального оборудования. Наряду с полимерными диэлектриками известны также полупроводниковые и электропроводящие полимерные материалы. К диэлектрикам относятся полимеры, молекулы которых не содержат легко диссоциирующихся на ионы групп и сопряженных двойных связей вдоль макроцепи. *Электропроводность* у этих полимеров при комнатной температуре не превышает  $10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}$ . Для полимерных полупроводников электропроводность  $10^{-8} - 10^{-1} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}$ . Для них характерно наличие сопряженных двойных связей или комплексов с переносом заряда. Электропроводящие полимерные материалы обычно являются композициями полимер – проводящий наполнитель.

Высокие диэлектрические свойства большинства полимерных материалов способствуют накоплению электрических зарядов, возникающих под действием сил трения и других факторов на их поверхности. Аккумулирование статического электричества на поверхности пластмасс ухудшает их санитарно-гигиенические свойства, повышает пожарную опасность в по-

мещениях, где концентрируются пары легковоспламеняющихся жидкостей. Для снижения статической электризации полимерные материалы обрабатывают поверхностно-активными веществами – антистатиками, которые резко повышают поверхностную электропроводность полимеров. При широких колебаниях значений относительной влажности можно применять как поверхностную обработку материалов антистатиками, так и введение их в процессе получения полимеров. Широко используют способы придания полимерам антистатических свойств путем подбора их композиций с сажой, пластификаторами и другими проводящими материалами.

*Пожароопасность* пластмасс характеризует их способностью воспламеняться и гореть как в зоне огня, так и вне ее. По степени пожароопасности полимерные материалы разделяют на легковоспламеняющиеся, сгораемые, трудновоспламеняющиеся и трудносгораемые, несгораемые. Испытания на степень пожароопасности полимерных, как и других строительных материалов, проводят в “огневой трубе” где образцы поджигают и фиксируют продолжительность их самостоятельного горения и тления. К сгораемым относят материалы, самостоятельно горящие в течение 1 мин с потерей массы более 20%, несгораемым – материалы которые не горят при нагревании до 750°C и имеют потери массы после испытания менее 10%. Большинство полимерных материалов являются сгораемыми. К трудносгораемым относятся материалы, которые с трудом загораются в зоне огня, однако самопроизвольно прекращают гореть и тлеть после выноса из нее (поливинилхлоридные, карбамидоформальдегидные материалы, полимербетоны). Несгораемыми полимерными материалами являются фторопласты, материалы из перхлорвинила.

Наряду с минеральными наполнителями сгораемость пластмасс существенно снижают добавки антипиренов.

Большинство полимерных материалов характеризуется высокой *химической стойкостью*, позволяющей их использовать для противокоррозионной защиты строительных конструкций, изготовления труб, емкостей для хранения химически агрессивных веществ. Из термопластичных полимерных материалов, применяемых для защитных покрытий, используют поливинил-

ацетатные латексы, инден-кумароновые, бутадиен-стирольные полимеры, хлоркаучук, полиэтилен, поливинилхлорид и др., из термореактивных – алкидные, фенолформальдегидные, эпоксидные материалы, полиуретаны. Наиболее высокую химическую стойкость имеют фторопласты.

Большинство пластмасс стойки не только к действию химических реагентов, но и к действию грибков, бактерий, насекомых и грызунов, то есть *биостойки*. Биологически стойкими являются пластмассы, включающие древесный наполнитель (древесностружечные и древесноволокнистые плиты), некоторые высокопористые пластмассы (мипора), изделия из полиэтилена. При повышенной влажности и температуре элементы зданий с использованием древесностружечных и древесноволокнистых плит, а также мипоры могут портиться грибками и бактериями. Трубы, пленки и другие изделия из полиэтилена поражаются грызунами. Биостойкость пластмасс улучшают добавками антисептиков. В полиэтиленовые изделия для предотвращения от повреждения грызунами добавляют каменноугольный пек и некоторые другие вещества.

При использовании пластмасс для пола, внутренней облицовки стен важно учитывать их *санитарно-гигиенические свойства*. Ряд пластмасс, особенно на основе фенолформальдегидных, полиэфирных, эпоксидных полимеров, при неполном завершении процессов поликонденсации или полимеризации, содержании токсичных пластификаторов, отвердителей, растворителей могут выделять вещества, вредные для здоровья людей и животных. Статическое электричество, накапливающееся на пластмассах может иметь стимулирующее влияние на микрофлору.

Под влиянием тепла, света, кислорода воздуха в пластмассах в той или иной мере происходит изменение эксплуатационных свойств – *старение*. Процесс старения ускоряется под действием механических нагрузок. Старение пластмасс резко замедляется при введении добавок-стабилизаторов.

В зависимости от наиболее характерных свойств пластмассы можно разделить на ряд групп (табл. 14.6).

Характерные свойства пластмасс

| Технические свойства и назначение пластмасс | Полимеры                                                                                                                             |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Общего назначения                           | Поливинилхлорид, полипропилен, фенопласты, аминопласты                                                                               |
| Высокопрочные                               | Полиформальдегид, фенопласты, эпоксидные и полиэфирные стеклопластики, поликарбонат, полиуретан, полиамиды                           |
| Теплостойкие                                | Политетрафторэтилен, полипропилен, фенопласты, полиорганосилоксаны                                                                   |
| Несгораемые или самогорящиеся               | Поливинилхлорид, модифицированный полиэтилен, политетрафторэтилен, модифицированные полиэфирные стеклопластики, фурановые пластмассы |
| Морозостойкие                               | Полиизобутилен, разветвленный полиэтилен, этилцеллюлоза, полиорганосилоксаны, поликарбонат, некоторые виды каучуков                  |
| Электроизоляционные                         | Полиэтилен, поливинилхлорид, полистирол, полиорганосилоксаны, фторопласты, эпоксидные пластмассы                                     |
| Прозрачные                                  | Полиметилметакрилат, поливинилбутераль, полистирол, ацетилцеллюлоза, поликарбонат, полиэфиракрилаты, полиэфирмалеинаты               |
| Антикоррозионные                            | Каучуки, полиизобутилен, эпоксипласты, фурановые пластмассы, поливинилхлорид, инден-кумароновые полимеры                             |

### 14.3. Основные виды строительных полимерных материалов

Все многообразие пластмасс можно классифицировать в зависимости от состава, свойств, сортамента, способа переработки в изделия, функционального назначения. Область применения пластмасс в современном строительстве чрезвычайно широка, их используют как конструкционные, отделочные, гидроизоляционные и герметизирующие, теплозвукоизоляционные материалы, а также материалы

для трубопроводов, санитарно-технических изделий и др. Одни и те же пластмассы могут иметь различное функциональное назначение. Например, стеклопластики могут применяться как конструкционные, кровельные и отделочные материалы, для изготовления труб, коррозионной защиты, сантехнических изделий и др.

Ниже приводится характеристика основных видов пластмасс, широко применяемых в строительстве.

**Конструкционные и облицовочные пластмассы.** В эту группу входят рассмотренные в разд. 12 древесные пластики, а также бумажно-слоистые и стеклопластики, листы и плитки из поливинилхлорида, полистирола, полиэтилена и полипропилена, органического стекла (полиметилметакрилата), профильные погонажные изделия.

*Бумажно-слоистый пластик* – листовой материал, который получают горячим прессованием специальных видов бумаги, пропитанных синтетическими термореактивными полимерами (рис. 14.13).

Бумажно-слоистый пластик – гигиеничный, свето- и теплостойкий, твердый и декоративный материал. Благодаря достаточной химической стойкости, он не разрушается от действия разных моющих средств, растворов кислот и щелочей, органических растворителей и минеральных масел. Пластик выдерживает нагревание до 130 °С. В зависимости от качества лицевой поверхности и физико-механических показателей он делится на марки: А – для применения в условиях, требующих повышенной стойкости против износа; Б – для применения в менее жестких условиях; В – для применения как отделочного материала.

Длина листов – 400-3000 мм, ширина – 400-1600 мм и толщина – 1-3 мм.

Лицевой слой состоит из трех слоев бумаги: белого – подкладочного; основного, определяющего цвет и рисунок пластика; верхнего – защитного, из прозрачной бумаги (оверлея); все они пропитываются светлой прозрачной карбамидоформальдегидной смолой. Внутренний слой обеспечивает прочность бумажно-слоистого пластика, он образуется из нескольких слоев плотной бумаги, пропитанной фенолформальдегидной смолой. Разрушающее напряжение при изгибе пластика в зависимости от марки должно быть не менее 98-117 МПа. Нормируется также стойкость пластика в кипящей воде (увеличение массы не более 6-8 %).

Бумажно-слоистым пластиком облицовывают стены жилых, общественных и производственных сооружений, транспортных средств, торгового оборудования, дверных полотен и т.п.

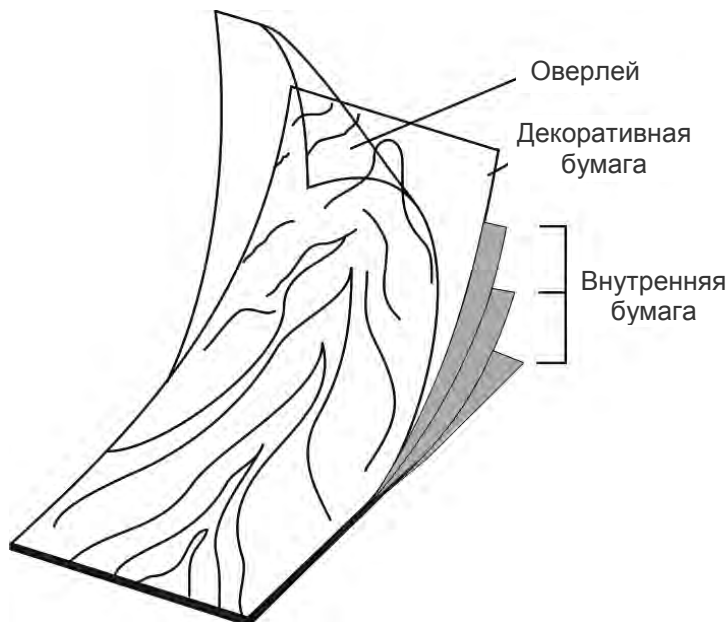


**Рис. 14.13.** Декоративный бумажно-слоистый пластик

*Стеклопластики* – материалы из стеклянных волокон или тканей, пропитанных синтетическим полимером. В зависимости от вида и размещения наполнителя различают стеклопластики на основе ориентированных волокон, рубленых волокон, тканей или матов.

В строительстве находят применение конструктивный стеклотекстолит и листовые стеклопластики. *Стеклотекстолит* получают горячим прессованием пакетов из обработанных полимерным связующим полотнищ стеклянной ткани. Основным связующим для стеклотекстолита являются фенолформальдегидные смолы резольного типа. Физико-механические свойства стеклотекстолита приведены в табл. 14.7.

Конструкционным стеклотекстолитом в виде листов толщиной 0,5-7 мм можно обшивать трехслойные панели стен и покрытий в сооружениях химических предприятий, трехслойные элементы про-

странственных конструкций и конструкций, которые эксплуатируются в химически агрессивных средах.

Таблица 14.7

## Физико-механические свойства стеклотекстолита

| Показатель                                         | Марки   |         |        |         |
|----------------------------------------------------|---------|---------|--------|---------|
|                                                    | ВФТ-С   | КАСТ-В  | КАСТ-Р | КАСТ    |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup> , не более            | 1850    | 1850    | 1850   | 1900    |
| Водопоглощение изделий разной толщины, %, не более | 0,8-2,1 | 0,6-2,1 | 1,4    | 2,4-3   |
| Предел прочности, МПа, не менее:                   |         |         |        |         |
| - на сжатие параллельно слоям                      | 88      | 54...64 | -      | -       |
| - на растяжение по основе                          | 314-392 | 211-299 | 294    | 294-304 |
| Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup> , не менее:   |         |         |        |         |
| - по основе                                        | 88-123  | 59-113  | -      | -       |
| - по утку                                          | 64-98   | 49-88   | -      | -       |

Листовые стеклопластики бывают неокрашенными или окрашенными, плоскими или волнистыми, полученными горячим прессованием или непрерывным формованием стеклянного волокна, обработанного полимерным связующим. Связующими служат преимущественно полиэфир (полиэфирмалеинаты и полиэфиракрилаты), реже – фенолформальдегидные и эпоксидные полимеры.

Листовой стеклопластик выпускают трех типов: плоский и волнистый с продольной или поперечной волной; каждый тип делится на марки А и В. Длина листов плоского и волнистого стеклопластика с продольной волной 1000-6000, ширина не меньше чем 800, толщина 1,5; 2 и 2,5 мм; длина листов с поперечной волной не больше чем 4000, ширина не меньше чем 800, толщина 1,5; 2 и 2,5 мм. В листах не допускаются трещины, отколы, вздутия и посторонние включения.



Стеклопластик изготавливают непрозрачным (лист 1 мм толщиной пропускает до 50 % падающего на него света), полупрозрачным (50-60%) и прозрачным (60-85%).

Листовой полиэфирный стеклопластик характеризуется химической стойкостью, легко поддается механической обработке, может эксплуатироваться в интервале температур от -50 до +80 °С. Его используют для декоративной отделки стен общественных и промышленных сооружений, изготовления светопрозрачных легких ограждающих конструкций стен и покрытий.

*Листы из непластифицированного поливинилхлорида* (винипласта) применяют для облицовки внутренних стен производственных сооружений, где на стены действуют разные кислоты и щелочи, их изготавливают из непластифицированной поливинилхлоридной композиции с добавками вспомогательных веществ (стабилизаторы, смазки и т.п.) прессованием или экструзией. Температурный диапазон эксплуатации листов от 0 до 60°С при отсутствии действия на пластик ударов и вибрации. Допускается нижняя граница эксплуатации до -50 °С. Листы выпускают длиной не менее 1300 мм, шириной 700 мм и толщиной 1-20 мм.

Листы для устройства светопрозрачных ограждений, а также декоративные плиты изготавливают также из *полистирола*. Для облицовки внутренних стен общественных, административных и промышленных зданий применяют также *листы из пропилена* и *полиэтилена*. Полипропиленовым листам свойственна повышенная теплостойкость, они могут работать при температуре до 100°С. Полиэтиленовыми листами облицовывают стены помещений, где необходимы водонепроницаемость и химическая стойкость.

*Стекло органическое техническое (оргстекло)* представляет собой полимерный материал на основе метилового эфира метакриловой кислоты. Акриловое стекло устойчиво к атмосферным воздействиям, не разрушается под действием ультрафиолетовых лучей, ударопрочное и морозостойкое. В зависимости от назначения выпускают бесцветное прозрачное, цветное прозрачное и цветное непрозрачное оргстекло.

Марки стекла: ТОСП – стекло органическое техническое пластифицированное, ТОСН – стекло органическое техническое непластифицированное.

#### 14. Полимерные материалы

Техническое органическое стекло изготавливают в виде листов прямоугольной формы до 1250 мм длиной и шириной, толщиной от 0,5 до 24 мм.

Физико-механические показатели оргстекла должны отвечать нормам, приведенным в табл. 14.8.

Таблица 14.8

Физико-механические свойства технического  
органического стекла

| Показатель                                                                                     | Норма для марок прозрачного стекла |      |          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------|----------|
|                                                                                                | бесцветного                        |      | цветного |
|                                                                                                | ТОСП                               | ТОСН | ТОСП     |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                                                                   | 1180                               | 1180 | 1180     |
| Прочность на разрыв, МПа, не меньше                                                            | 55,0                               | 69,0 | 59,0     |
| Относительное удлинение при растяжении, %, не меньше                                           | 2                                  | 2,5  | 2        |
| Линейная усадка, %                                                                             | 3,5                                | 3,5  | 3,5      |
| Коэффициент пропускания, %, не меньше (для бесцветного стекла с номинальной толщиной до 30 мм) | 88                                 | 88   | -        |
| Температура размягчения, °С, не ниже, для листов толщиной 3-6 мм                               | 92                                 | 110  | -        |
| 7-24 мм                                                                                        | 92                                 | 112  | -        |
| 25-200 мм                                                                                      |                                    | 113  | -        |
| Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup> , не меньше, для листов толщиной 3-4 мм                   | 8,8                                | 8,8  | 7,8      |
| 5-24 мм                                                                                        | 13                                 | 15   | 12       |
| 25-200 мм                                                                                      | -                                  | 15   | -        |

Органическое стекло используют для остекления парников, теплиц, оранжерей, плавательных бассейнов, больниц, санаториев, производственных сооружений. Оно склеивается разными клеями (на основе дихлорэтана и т.п.), распиливается, сверлится.

К органическим стеклам наряду с полиметилметакрилатом относится *поликарбонат* – материал, являющийся полиэфиром угольной кислоты и фенолов. Поликарбонат характеризуется термостойкостью в широком диапазоне температур, самой высокой среди полимеров ударопрочностью. Вместе с тем он не стоек к воздействию

ультрафиолетовых лучей и требует специальной защиты. Поверхность поликарбоната чувствительна к контактным механическим повреждениям. Высокая газо- и паропроницаемость приводит к впитыванию влаги из атмосферы, а при снижении относительной влажности – к выпариванию этой влаги на поверхность.

По степени светопропускания к акриловому стеклу и поликарбонату близки листы из *полиэтилентерефталата* (ПЭТ). Этот материал имеет повышенную стойкость к внешним воздействиям, что позволяет длительно эксплуатировать изделия на открытом воздухе. ПЭТ относится к трудногорючим материалам, не поддерживающим горение.

В качестве органического стекла находит также применение *стиролакрилонитрил* (САН) – продукт сополимеризации стирола и акрилонитрила. По сравнению с акриловым стеклом он обладает повышенной прочностью и жесткостью, термопластичностью, имеет высокую стойкость к ультрафиолетовым лучам и другим внешним воздействиям.

Из плиточных изделий для внутренней облицовки стен и перегородок применяются преимущественно полистирольные плитки.

*Полистирольные плитки* применяют для облицовки внутренних стен и перегородок помещений жилых, общественных и производственных зданий с повышенным влажностным режимом эксплуатации. Запрещается облицовка полистирольными плитками стен и перегородок из легковоспламеняющихся материалов, а также помещений с нагревательными приборами открытого огня, детских учреждений и лестничных клеток.

Наряду с полистирольными для облицовки стен применяют *фенолитовые плитки*, получаемые прессованием смеси из фенолформальдегидных смол, отвердителя и наполнителя (древесная мука, каолин, тальк и др.). Фенолитовые плитки предназначены для облицовки внутренних стен лабораторий, производственных цехов и других помещений, где возможно воздействие на облицовку агрессивных химических сред.

*Профильные погонажные изделия* изготавливают способом экструзии на основе поливинилхлорида или его сополимеров с разными добавками. По показателям физико-механических свойств их делят на мягкие, полужесткие, по функциональному назначению – на пластиковые панели (вагонку), перила, плинтусы.

**Пластмассы для покрытия пола.** Рулонные и плиточные полимерные материалы для полов классифицируют по основному сырью, структуре, жесткости и др.

*Рулонные полимерные материалы* по виду основного сырья делят на поливинилхлоридные, алкидные, резиновые, коллоксилиновые и на основе синтетических волокон. По структуре они бывают безподосновные (одно- и многослойные) и с подосновой (тканевой, пленочной и теплозвукоизоляционной).

Все рулонные материалы относятся к гибким (трещины не образуются при изгибании образца вокруг стержня диаметром меньше чем 100 мм).

Линолеумы выпускают одно- и многоцветными с гладкой, рифленой, тисненой и ворсовой фактурой.

*Поливинилхлоридный много- и однослойный линолеум без подосновы* используют для покрытия полов (рис. 14.14) помещений жилых, общественных и промышленных зданий, кроме помещений, связанных с интенсивным движением, действием абразивных материалов, жиров и масел.

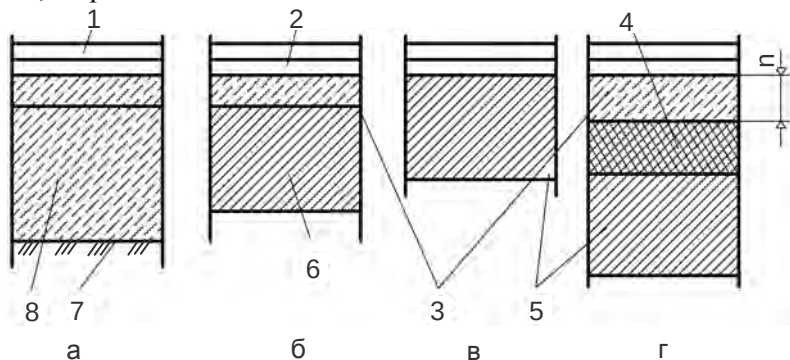


**Рис. 14.14.** Полы из линолеума:

- а – на грунте; б – на перекрытии со стяжкой; в – на плите перекрытия; г – на перекрытии со стяжкой, уложенной на тепло- или звукоизоляционном слое; 1 – покрытие; 2 – клеевая прослойка; 3 – стяжка; 4 – тепло- или звукоизоляционный слой; 5 – плита перекрытия с ровной поверхностью; 6 – плита перекрытия; 7 – грунт основания; 8 – бетонный подстилающий слой

Линолеум в зависимости от структуры изготавливают трех типов:  
 - МП – многослойный с лицевым слоем из прозрачной поливинилхлоридной пленки с печатным рисунком;

- М – многослойный одноцветный или мраморовидный;
- О – однослойный одноцветный или мраморовидный.

Длина полотнища в рулоне – не менее 12 м, ширина – 1200-1400мм, толщина – 1,5-1,8 мм.

Показатели физико-механических свойств линолеума должны соответствовать приведенным в табл. 14.9.

Линолеум не должен накапливать статическое электричество.

Наряду с обычным без подосновы изготавливают поливинилхлоридный линолеум на тканой и нетканой подоснове. Улучшенные тепло- и звукоизоляционные свойства линолеума достигаются при применении соответствующих видов подосновы, декоративные свойства – применением одно – и многоцветной гладкой или тисненной лицевой поверхности с печатным рисунком.

Поливинилхлоридные линолеумы без подосновы наклеивают клеями и мастиками на основе синтетических полимеров и каучуков, на тканевой подоснове – на основе битумов (битумно-синтетические клеи), на теплоизолирующей подоснове – дисперсионными (бустилат, гумилакс и др.) клеями и мастиками.

Таблица 14.9

Показатели физико-механических свойств  
поливинилхлоридного линолеума без подосновы

| Показатель                                                                | Типы |      |      |
|---------------------------------------------------------------------------|------|------|------|
|                                                                           | МП   | М    | О    |
| Истираемость, мкм, не больше                                              | 60   | 100  | 120  |
| Деформативность при вдавливании, мм, не больше:                           |      |      |      |
| абсолютная деформация                                                     | 0,40 | 0,50 | 0,60 |
| абсолютная остаточная деформация                                          | 0,20 | 0,25 | 0,25 |
| Изменение линейных размеров, %, не больше, для линолеума, изготовленного: |      |      |      |
| каландровым или вальцовым способом                                        | 1,0  | 0,5  | 0,5  |
| экструзионным способом                                                    | 1,0  | 1,0  | 1,0  |
| Прочность связи между слоями, Н/м, не менее                               | 980  | -    | -    |

*Алкидный (глифталевый) линолеум* изготавливают из алкидных смол, наполнителей и пигментов на подоснове из тканых и нетканых материалов. Используют его для покрытия полов помещений жилых, общественных, детских, лечебно-профилактических и про-

изводственных зданий, вагонов метрополитена и других поверхностей, которые не испытывают влияния кислот, щелочей и растворителей.

К недостаткам алкидного линолеума относятся повышенная хрупкость и склонность к трещинам и изломам. Трещины появляются обычно при неправильном транспортировании, хранении и укладке. Алкидный линолеум следует хранить только в вертикальном положении, укладывать при температуре не ниже 10 °С. При минусовой температуре линолеум становится хрупким.

*Линолеум резиновый многослойный – релин* – изготавливают из резиновых смесей на основе синтетических каучуков. Используют для покрытия полов помещений жилых, общественных и производственных сооружений, а также в вагонах наземного транспорта.

В зависимости от состава резиновых смесей релин делят на типы: А – для покрытия полов помещений жилых, общественных, производственных зданий и в вагонах наземного транспорта; Б – для покрытия полов помещений общественных и производственных зданий, оборудованных принудительной вентиляцией; В (антистатический) – для покрытия полов помещений хирургических операционных и специальных лабораторий.

Релин надо хранить в закрытом помещении с температурой не ниже 10°С, защищая его от действия солнечных лучей, на расстоянии не меньше чем 1 м от теплоизлучающих приборов. Хранить и транспортировать рулоны релина следует в вертикальном положении в один ряд.

Эксплуатационные свойства релина сохраняются в интервале температур от -25 до +80 °С. Недостатками являются специфический запах, слабое сцепление с клеящими мастиками. В жилых помещениях допускается укладывать релин на основе каучуков, которые отличаются незначительной токсичностью, низкой электризованностью и стойкостью против старения.

Для *коллоксилинового (нитроцеллюлозного) линолеума* (НЛГ) полимерным сырьем является коллоксилин – продукт нитрации древесной или хлопчатобумажной целлюлозы. Качество коллоксилинового линолеума зависит от состава наполнителей. Лучшие сорта линолеума получают, наполняя массу асбестом. Более низкое качество линолеума с наполнителями из гипса, пиритных огарков и т.п. Не допускается его применение в помещениях, где

работают с кислотами, щелочами, растворителями, а также, где на линолеум действуют вода, жиры, масла, абразивные материалы (песок, металлическая стружка), в помещениях с температурой ниже  $0^{\circ}\text{C}$  и выше  $50^{\circ}\text{C}$ .

Линолеумы изготавливают промазным, вальцово-каландровым и экструзионным способами. Сущность промазного способа заключается в приготовлении линолеумной пасты, нанесении ее на движущуюся подоснову, термической обработке, обрезке и сортировке (рис. 14.15).

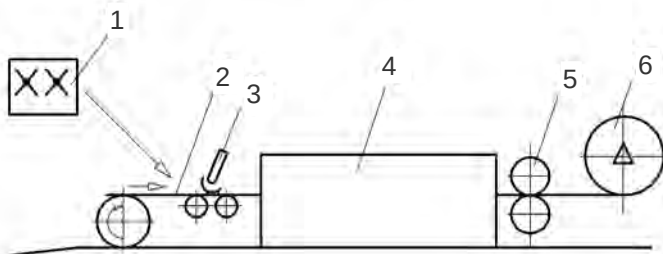


**Рис. 14.15.** Принципиальная схема производства линолеума промазным способом:

1 – горизонтальный двуххлопастный смеситель; 2 – тканевая или войлочная основа; 3 – грунтовальное устройство; 4 – терможелеiroвочная камера; 5 – охлаждающие вальцы; 6 – намотка в рулон

Вальцово-каландровый способ основан на получении высоконаполненной массы методом пластикации (с применением пластификаторов) в смесителях и на вальцах с последующим формированием полотна на каландрах (рис. 14.16).

При экструзионном способе сырьевая смесь для нижнего и верхнего слоев линолеума подвергается экструдированию путем продавливания через мундштук экструдера с последующим объединением в двухслойное полотно, его термостабилизации, обрезки кромок и намотки в рулоны.

Линолеумы могут быть заменены *синтетическими ковровыми покрытиями* (рис. 14.17).

Они находят применение для устройства полов в жилых и офисных помещениях, зданиях повышенного класса (студиях, санаторно-курортных и детских учреждениях, отелях). Синтетические ковры в зависимости от материала бывают капроновыми, полиамид-

#### 14. Полимерные материалы

ными, шерстяными и др., в зависимости от технологии – ткаными, ворсопрошивными (тафтинговыми), клеевыми (неткаными) и иглопробивными (войлочными). Они могут быть однотонными или иметь многоцветный рисунок, гладкую или рельефную поверхность. Последняя создается за счет сочетания ворса различной высоты, тиснением и другими способами. Ковровые покрытия желательно устраивать в больших помещениях с хорошей циркуляцией воздуха и неинтенсивным солнечным облучением.

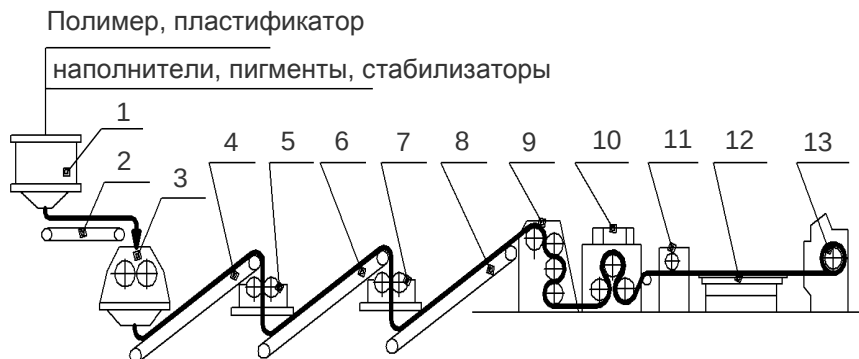


**Рис. 14.16.** Схема производства однослойного поливинилхлоридного линолеума каландровым методом: 1, 3 – смеситель; 2, 4, 6, 8, – конвейеры; 5, 7 – вальцы; 9 – каландр; 10 – охладитель; 11 – станок для обрезки; 12 – стол; 13 – рулон

Широкое применение для покрытий полов получили *пластмассовые плитки*. Они обеспечивают большое число дизайнерских решений, возможность легкого ремонта и доступа к коммуникациям, уложенным под покрытием. Их разделяют по виду основного сырья, по цвету (одно- и многоцветные), по форме (квадратные, прямоугольные, фигурные), по фактуре лицевой поверхности (гладкие, рифленые). Плитки получают на основе полимерных композиций методом прессования или вырубкой металлическим штампом из немерных кусков линолеума.

Наиболее распространены *поливинилхлоридные плитки* для полов. Размеры плиток: 150×150, 200×200, 300×300 мм и др. Истираемость плиток – не более 120-160 мкм, абсолютная деформация при вдавливании – 0,12-0,25 мм, изменение линейных размеров – 0,1-0,25 %. Кроме поливинилхлоридных применяют также более жесткие и износостойкие *кумароновые плитки*, изготавливаемые из сме-



си инден-кумаронового полимера, порошквидного и волокнистого наполнителя и пластификатора.

Для устройства полов помещений с высокоагрессивной средой и значительными нагрузками на пол применяют *фенолитовые плитки* полученные прессованием смесей, содержащих фенолоальдегидные полимеры. Из смеси измельченных отходов резины с отходами ас-

бестового производства и вулканизующих добавок получают *асбестозбонитовые плитки*. По свойствам к коллоксилиновому и резиновому линолеумам близки *коллоксилиновые и резиновые плитки*.

Для устройства монолитных наливных полов применяют полимерные мастики и бетоны. Покрытия на их основе технологичны, отличаются высокой химической стойкостью, прочностью и износостойкостью, они гигиеничны и удобны в эксплуатации. В качестве связующих полимерных мастик, растворов и бетонов применяют терморек-

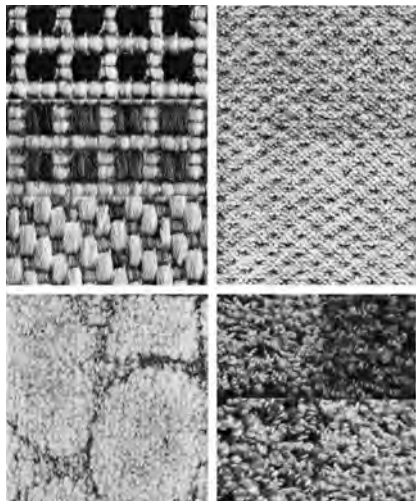


**Рис. 14.17.** Синтетические ковровые покрытия

тивные и реже термопластичные полимеры. В материалы, применяемые для полимерных наливных полов, вводят дисперсные наполнители с размером частиц менее 0,14 мм, имеющие высокую химическую и износостойкость, а также ряд других функциональных добавок (пластификаторы, отвердители и др.).

Для наливных полов находят применение поливинилацетатные и латексные мастичные покрытия.

**Гидроизоляционные пластмассы.** Полимерные материалы широко применяют для оклеечной, штукатурной, окрасочной и облицовочной гидроизоляции строительных конструкций. Для оклеечной гидроизоляции, представляющей собой сплошной водонепроницаемый ковер рулонных материалов, наклеиваемых послойно на огрунтованную поверхность применяют рулонные материалы на основе битумно-полимерных и полимерных вяжущих.

К рулонным гидроизоляционным материалам на основе синтетических полимеров относятся полиэтиленовые, поливинилхлоридные, полиизобутиленовые армированные и неармированные пленки и мембраны.

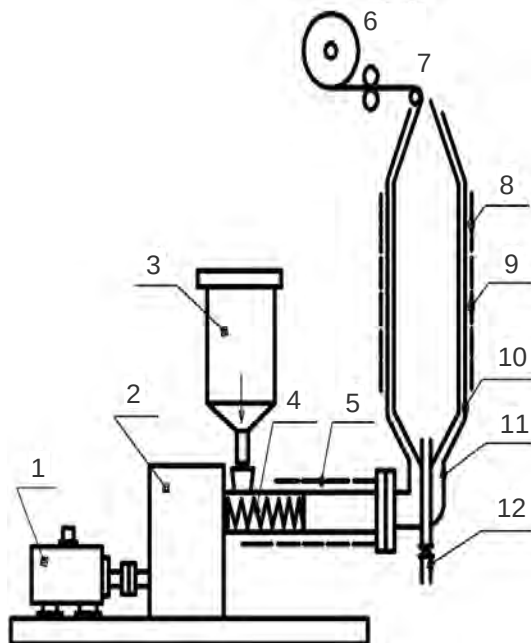


**Рис. 14.18.** Схема производства полиэтиленовой пленки:  
 1 – электродвигатель экструдера; 2 – редуктор экструдера;  
 3 – бункер гранулированного полиэтилена; 4 – червяк экструдера;  
 5 – устройство для обогрева; 6 – рулон полиэтиленовой пленки;  
 7 – валки; 8 – зона охлаждения пленки; 9 – устройство для обогрева термокамеры;  
 10 – термокамера; 11 – головка экструдера; 12 – введение воздуха для раздува пленки

Полимерные пленки, применяемые для гидроизоляции, имеют толщину 0,2-0,4мм, мембраны – до 1мм и более. Они изготавливаются в основном методом раздува (рис. 14.18.) или каландрирования из композиции на основе полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида, полиизобутилена. В состав композиций могут входить кроме синтетических полимеров наполнители, пластификаторы, стабилизаторы, пигменты и другие добавки. Для самоприклеиваю-

щихся пленок на тыльную сторону наносят слой клея, накрывают бумажной подкладкой, предварительно обработанной (например, раствором кремнийорганического полимера) для предотвращения адгезии к клею.

Для повышения прочности пленки армируют стеклянными, вискозно-целлюлозными волокнами, полиэстеровой, лавсановой, пропиленовой нитью и др.

*Армированные пленки* представляют собой трехслойный материал, состоящий из двух внешних слоев светостабилизированной пленки, между которыми находится слой армирующей сетки. Армированные полиэтиленовые пленки, применяемые для подкровельной гидро- и пароизоляции делятся на перфорированные и неперфорированные (рис. 14.19). Перфорированные пленки имеют микроотверстия, обеспечивающие более высокую степень паропроницаемости.

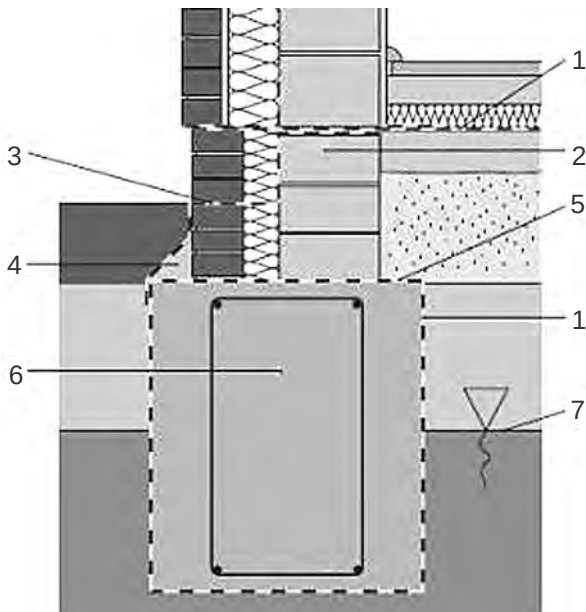


**Рис. 14.19.** Схема гидроизоляции фундамента:

1 – изоляционная пленка; 2 – стена фундамента; 3 – пленка для гидроизоляции стены фундамента; 4 – откос из строительного раствора; 5 – горизонтальная пленочная изоляция стены фундамента; 6 – ленточный фундамент; 7 – уровень грунтовых вод

Для пароизоляции в помещениях с повышенным содержанием пара применяют пленки с внутренней стороны ламинированные алюминиевой фольгой (пленки с отражающим слоем). Такие пленки особенно эффективны для пароизоляции в жарких и очень влажных помещениях, таких как кухни, сауны, бассейны и т.д.

Из полимерных гидроизоляционных пленок наиболее распространена *полиэтиленовая пленка*. Она изготавливается обычно из композиций на основе полиэтилена высокого давления (низкой плотности) как прозрачной, так полупрозрачной и непрозрачной разных цветов. Ширина пленки в рулонах достигает 1420 мм, длина до 150 м. Полиэтиленовая пленка био- и химически стойкая, выдерживает температуру от  $-70$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ , предел прочности ее при растяжении достигает 15 МПа и выше, относительное удлинение при разрыве – более 300%. К недостаткам полиэтиленовой пленки относится склонность к старению под воздействием кислорода воздуха и ультрафиолетовых лучей. Полиэтиленовая пленка легко сваривается, и наклеивается на различные поверхности с помощью битума, полиизобутиленового и эпоксидного клеев.

*Полипропиленовая пленка* по сравнению с полиэтиленовой имеет более высокую прочность и стойкость к воздействию ультрафиолетовых лучей.

*Поливинилхлоридная пленка* изготавливается из смеси, основными компонентами которой являются полихлорвиниловая смола, пластификатор, придающий пленке эластичность, и стабилизатор, связывающий хлористый водород, который выделяется при нагревании. Из большой группы, выпускаемых промышленностью поливинилхлоридных пленок, для гидроизоляции применяют пленки марки Г, имеющие прочность при разрыве 10-19 МПа и относительное удлинение не менее 130-250%. Температура, при которой пленка приобретает хрупкость – минус  $30^{\circ}\text{C}$ .

Для гидроизоляции и устройства кровель применяют ряд эластомерных рулонных материалов на основе синтетических каучуков (гидробутил, бутерол, бутит, бутирон и др.), изготовленных из резиновых смесей.

Для облицовочной гидроизоляции используют листовые полимерные материалы, толщиной 1-2 мм, соединенные между собой в стыках сваркой или склеиванием. Крепление листов к изолируемой поверхности может осуществляться дюбелями, прижимными планками и мастиками. Эффективно применение для

гидроизоляции полиэтиленовых листов с анкерными ребрами, которые обеспечивают закрепление листов в бетон при бетонировании.

**Теплоизоляционные пластмассы.** Тепло- и звукоизоляционными свойствами обладают пластмассы с ячеистой и пористой структурами. Образование таких структур возможно химическим, физическим и механическим способами. Сущность химического способа заключается во вспенивании полимера газами, образующимися при разложении газообразователя или в результате взаимодействия исходных компонентов. При физическом способе ячеистая структура образуется при интенсивном расширении растворенных в полимерной композиции газов при снижении давления и повышении температуры массы. При механическом пенообразовании ячеистая структура формируется вследствие интенсивного перемешивания. Особый вид ячеистой (сотовой) структуры получают при склеивании гофрированных листов или блоков с последующим их фиксированием термореактивными полимерами.

Теплоизоляционные пластмассы относятся к наиболее легким материалам. Их плотность колеблется от 10 до 200 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность – от 0,03 до 0,05 Вт/(м·°C). Механические свойства ячеистых и пористых пластмасс зависят в основном от вида полимеров и способов порообразования. Большинство теплоизоляционных пластмасс являются горючими. Некоторые из них (фенольные пенопласты) могут не загораться, но под действием огня они деформируются. Пенопласты с открытой пористостью обладают высокой способностью к звукопоглощению.

В зависимости от особенностей структуры различают ячеистые или пенистые пластмассы (*пенопласты*), пористые пластмассы (*поропласты*) и сотовые пластмассы (*сотопласты*).

Пенопласты являются наиболее распространенной группой теплоизоляционных пластмасс. Их изготавливают на основе термопластичных (полистирол, поливинилхлорид, полиуретаны и др.) и термореактивных (фенолформальдегидные, карбамидные, эпоксидные смолы) полимеров.

В строительной практике наибольшее применение нашел *пенополистирол*. Его получают на основе смеси полистирола и различных газообразователей прессовым и беспрессовым методами. В первом случае смесь прессуется в прессформах под давлением 15-20 МПа при температуре 140-170°C. В таких условиях разлагается

газообразователь, а зерна полистирола сплавляются в монолит. Окончательное вспенивание происходит в камерах в среде насыщенного водяного пара. Прессовый пенополистирол производится ограниченно под разными торговыми марками, отечественные аналоги – ПС-1, ПС-4.

Для изготовления пенополистирола более распространенным беспрессовым методом (ПСБ) (рис. 14.20) сырьем служит суспензионный (бисерный) полистирол, наполненный изопентаном. Пенопласт получают по двухстадийной схеме. На первой стадии (первичное вспенивание) гранулы нагревают до 80-100°C горячей водой или паром, в результате чего они увеличиваются в объеме более чем в 10 раз. На второй стадии (вторичное вспенивание) гранулы подсушивают, выдерживают на воздухе и спекают в формах при нагревании до 95-105°C. В местах контакта гранулы сплавляются, образуя монолитное изделие – блок. Окончательное вспенивание может осуществляться в перфорированных формах автоклавной обработкой (рис. 14.20), токами высокой частоты и другими способами. Заключительной операцией является разрезание блоков на плиты или другие изделия требуемых размеров.

В соответствии с ГОСТ 15588-86 пенополистирольные плиты беспрессовым методом изготавливают двух видов ПСБ-С – с антипиреном и ПСБ – без антипирена. Номинальные размеры плит находятся в диапазоне: длина 900-5000 мм, ширина – 500-1300 мм, толщина 20-5000 мм.

В зависимости от предельного значения плотности плиты подразделяют на марки: 15, 25, 35 и 50. Показатели физико-механических свойств пенополистирольных плит должны соответствовать нормам, указанным в табл. 14.10.

К современным теплоизоляционным материалам на основе полимеров относится *экструзионный пенополистирол*, имеющий равномерную структуру, состоящую из легких, полностью закрытых ячеек с размерами 0,1-0,2 мм. При экструзионном способе предварительно смешивают все компоненты и подают массу в экструдер. В экструдере масса уплотняется, нагревается и расплавляется, происходит разложение газообразователя. После выхода из экструдера смесь вспенивается. Экструзионный способ позволяет организовать непрерывный технологический процесс и получать изделия различного профиля и плотности. Для экструзионного пенополистирола характерна повышенная прочность и малая гигроскопичность.

# Полистирол

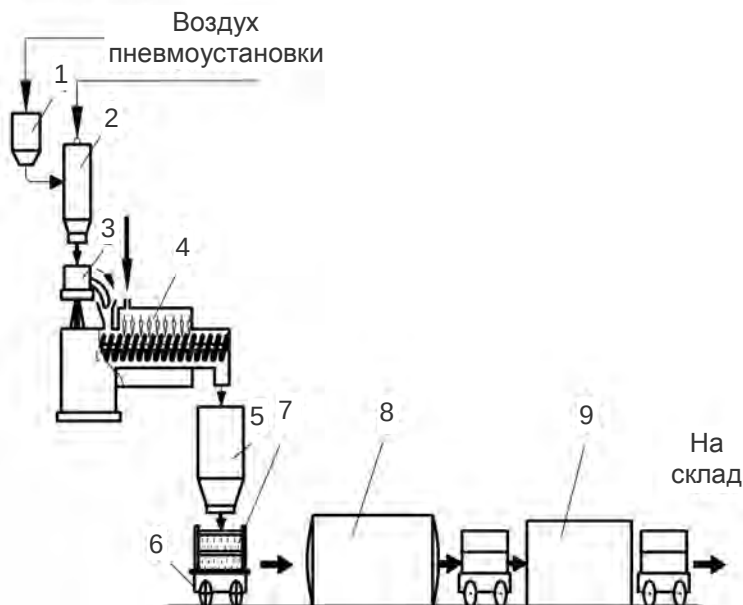


**Рис. 14.20.** Схема процесса производства пенополистирола с предварительным вспениванием и последующей автоклавной обработкой: 1 – приемный бункер; 2 – циклон; 3 – дозатор; 4 – шнек; 5 – бункер; 6 – вагонетка; 7 – форма; 8 – автоклав; 9 – сушильная камера

*Пенопласты на основе поливинилхлорида* также получают прессовым и беспрессовым методами. Прессовым методом получают жесткие пенопласты, беспрессовым – жесткие и эластичные. Поливинилхлоридные пенопласты имеют плотность  $50-130 \text{ кг/м}^3$  (ПВХ-1) или  $130-220 \text{ кг/м}^3$  (ПВХ-2).

Эластичный беспрессовый пенопласт изготавливают из смеси эмульсионного поливинилхлорида, дибутилфталата, метилметакрилата и порофора.

*Пенополиолефины* – газонаполненные материалы, изготовленные из полиэтилена, полипропилена, полиизобутилена. Для них характерна высокая химическая стойкость, эластичность, водостойкость.

#### 14. Полимерные материалы

Распространен экструзионный *пенополиэтилен (ППЭ)* в виде полупрозрачных гибких листов. Рулонный пенополиэтилен имеет плотность до  $30 \text{ кг/м}^3$ , может использоваться при температуре от  $-100$  до  $+100^\circ\text{C}$ . При ламинировании вспененного полиэтилена алюминиевой фольгой или лавсановой пленкой получают материал с высокой теплоотражательной способностью. Фольгированный пенополиэтилен с нанесенным клеевым слоем используется для утепления и звукоизоляции различных сложных по форме поверхностей, включая металлические конструкции.

Таблица 14.10

Физико-механические свойства пенополистирольных плит

| Показатели                                                                                                    | Нормы для плит марок |                 |                 |                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                                                                                               | 15                   | 25              | 35              | 50              |
| Плотность, $\text{кг/м}^3$                                                                                    | До 15                | От 15,1 до 25,0 | От 25,1 до 35,0 | От 35,1 до 50,0 |
| Прочность на сжатие при 10% линейной деформации, МПа, не менее                                                | 0,05                 | 0,10            | 0,16            | 0,20            |
| Предел прочности при изгибе, МПа, не менее                                                                    | 0,07                 | 0,18            | 0,25            | 0,35            |
| Теплопроводность в сухом состоянии при $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ , $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , не более | 0,042                | 0,039           | 0,037           | 0,040           |
| Время самостоятельного горения плит типа ПСБ-С, с, не более                                                   | 4                    |                 |                 |                 |
| Влажность, %, не более                                                                                        | 12                   |                 |                 |                 |
| Водопоглощение за 24 ч, % по объему, не более                                                                 | 3,0                  | 2,0             | 2,0             | 1,8             |



К числу эффективных пенопластов относятся *пенополиуретаны*. Они обладают очень низкой теплопроводностью ( $0,019-0,03$  Вт/(м·°С), малой паропроницаемостью и высокой адгезией к разнообразным материалам. На основе пенополиуретанов изготавливают эластичные и жесткие материалы. Для получения эластичных пенополиуретанов используют линейные полиэферы, а для жестких – разветвленные. В состав сырьевой смеси вводят добавки для снижения горючести и катализаторы, регулирующие вспенивание и отверждение полимера. При изготовлении пенополиуретана масса вспенивается углекислым газом, выделяющимся при взаимодействии исходных компонентов. Одновременно идет процесс образования пространственной структуры полимера. Эластичные пенополиуретаны имеют плотность  $30-50$  кг/м<sup>3</sup>, температурный интервал сохранения эластичности от  $-20$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ , прочность при сжатии  $0,1-0,12$  МПа. Их применяют для утепления полов, герметизации стыков панелей и дверных блоков и как прокладочный и амортизационный материал.

Жесткие пенополиуретаны выпускают в виде штучных изделий, а также заливают в полости строительных конструкций. Они имеют плотность  $60-200$  кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии  $0,2-2,5$  МПа, усадку  $0,4-0,6\%$  и водопоглощение  $0,1-0,2\%$ . Для улучшения свойств пенополиуретана и снижения расхода в массу вводят гранулы вспученного жидкого стекла (стеклопор). Хорошая адгезия пенополиуретанов к большинству материалов сделали возможным применение этого материала для напыления на строительные конструкции, особенно металлические. Напыленный слой служит одновременно теплогидроизоляцией и защитой металла от коррозии. Возможно применение напыленных пенополиуретанов для тепловой изоляции покрытий зданий, ограждающих конструкций холодильников, труб и т.д.

Повышенной тепло- и огнестойкостью характеризуются *пенопласты на основе фенолформальдегидных смол*. Они относятся к группе трудносгораемых, химически стойких материалов. Пенопласты изготавливают из смеси фенолформальдегидной смолы, отвердителя, газообразователя и наполнителей (стекловолокно, алюминиевая пудра и др.). Из пенопластов изготавливают изделия в виде плит, цилиндров, полуцилиндров, сегментов и др.

Теплоизоляционные плиты из пенопласта на основе резольных фенолформальдегидных смол при средней плотности 50-90 кг/м<sup>3</sup> имеют теплопроводность 0,041-0,045 Вт/(м·°С), прочность на сжатие при 10%-ной деформации 0,05-0,2 МПа, изгиб – 0,08-0,26 МПа. Плиты и другие изделия применяют для тепловой изоляции строительных конструкций при температуре изолируемой поверхности не выше 130°С.

Эффективными теплоизоляционными пластмассами являются пенопласты на основе эпоксидных полимеров – *пенополиэпоксиды*. По своим свойствам они близки к свойствам полиуретановых и фенольных пенопластов.

К наиболее легким пластмассам относятся *карбамидные поропласты*. Одна из разновидностей этих поропластов – *мипора* имеет плотность 10-20 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность – 0,025-0,041 Вт/(м·°С), прочность при сжатии 0,025-0,3 МПа. Мипора – трудносгораемый материал с температурой применения до 100°С. Мипору получают

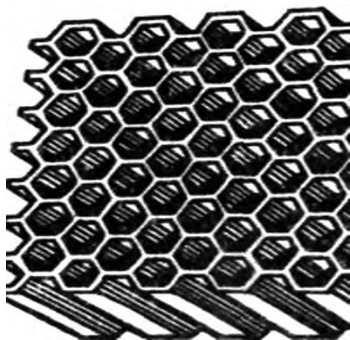


**Рис. 14.21.** Структура сотопласта

путем приготовления растворов полимера и пенообразователя их перемешивания и отверждения. Блочную мипору применяют в качестве теплоизоляционного материала в холодильной технике, железнодорожном транспорте, для звуко- и теплоизоляции стен и перегородок. Низкая прочность и влагоемкость ограничивает применение этого материала.

Эффективными теплоизоляционными материалами являются заливочные карбамидоформальдегидные поропласты (МФП). Их плотность 15-30 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии не менее 0,015 МПа, коэффициент теплопроводности 0,03-0,04 Вт/(м·°С).

*Сотопласты* – особый вид теплоизоляционных пластмасс, характеризующихся геометрически правильной структурой ячеек в виде пчелиных сот – шестигранников с размером сторон 5-10 мм (рис. 14.21).

Сотопласты могут изготавливаться из бумаги, хлопчатобумажной ткани, стеклоткани, алюминиевой фольги и других материалов,

пропитанных и склеенных термореактивными полимерами. Наибольшее применение находят сотовпласты с использованием карбамидных смол. Свойства сотовпластов зависят от формы и размера ячейки сот, прочности основы, вида полимера, применяемого для пропитки. Плотность сотовпластов –  $60-90 \text{ кг/м}^3$ , прочность и теплопроводность этих материалов зависит соответственно от направления приложения нагрузки и теплового потока. Предел прочности при сжатии сотовпластов параллельно стороне ячеек составляет 1,2-1,4, перпендикулярно – 0,1-0,2 МПа.

Сотовпласты находят применение для изготовления трехслойных конструкций и изделий: панелей стен, перегородок, дверей и др.

**Полимерные трубы.** Полимерные трубы изготавливают из композиций на основе термопластичных и термореактивных полимеров. Они обладают рядом преимуществ – в несколько раз легче металлических, устойчивы против действия воды, кислот и щелочей, не подвержены электрохимической коррозии, гибки. обладают низким сопротивлением движению жидкостей, низкой теплопроводностью.

Основные виды полимерных труб, используемых в строительстве – полиэтиленовые, поливинилхлоридные, полипропиленовые, из органического стекла и стеклопластиковые.

Недостатками полимерных труб являются их низкая теплостойкость и значительное линейное расширение.

Сравнительные свойства пластмассовых и стальных труб приведены в табл. 14.11.

*Полиэтиленовые трубы* изготавливают из полиэтилена высокого (ПЭВД) и низкого давления (ПЭНД). Допускаемое напряжение в стенках напорных труб, изготовленных из ПЭНД, составляет 5МПа, а ПЭВД – 2,5 МПа.

Основной способ производства полиэтиленовых труб – экструзионный (рис. 14.22). После экструзии гранулированного сырья сквозь кольцевую головку экструдера, труба калибруется в специальной насадке, охлаждается и скатывается в бухту или делится на отрезки.

Напорные полиэтиленовые трубы в соответствии с ГОСТ 18559-2001 в зависимости от номинального давления изготавливают четырех типов: Л – легкие (0,25 МПа), Сл – среднелегкие (0,4 МПа), С – средние (0,6 МПа) и Т – тяжелые (1,0 МПа). Номинальным счита-

#### 14. Полимерные материалы

ется постоянное внутреннее давление воды при 20°C, которое трубы могут выдерживать в течение 50 лет. Рабочее давление, на которое рассчитывают трубы при транспортировании воды зависит от температуры и необходимого срока службы. Например, при сроке службы 50 лет возможное рабочее давление для труб типа Л из полиэтилена высокого давления при повышении температуры с 20 до 30°C уменьшается с 0,25 до 0,16 МПа, а при 40°C – до 0,10 МПа.

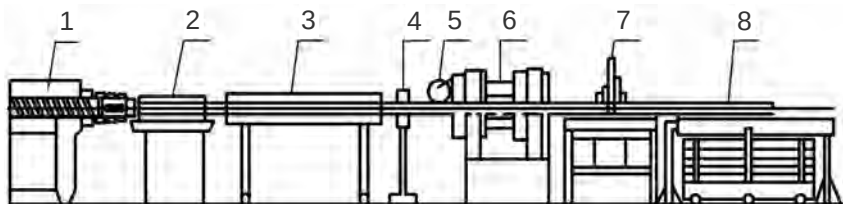


**Рис. 14.22.** Схема процесса экструзии трубы: 1 – экструдер; 2 – вакуумное калибрующее устройство; 3 – охлаждающая ванна; 4 – прибор для измерения толщины стенки трубы; 5 – прибор для маркировки труб; 6 – тянущее устройство; 7 – автоматическое отрезное устройство; 8 – штабелеукладчик

Таблица 14.11  
Сравнительные свойства пластмассовых и стальных труб

| Свойства                             | Трубы              |                |                  |          |
|--------------------------------------|--------------------|----------------|------------------|----------|
|                                      | поливинилхлоридные | полиэтиленовые | полипропиленовые | стальные |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>         | 1400               | 950            | 850-900          | 7800     |
| Температура применения, °C           | 60                 | 90             | 120              | 150      |
| Морозостойкость, °C                  | -15                | -60            | -50              | -        |
| Предел прочности при растяжении, МПа | 50                 | 14             | 35               | 200      |
| Стойкость:                           |                    |                |                  |          |
| в 60%-ной серной кислоте             | +                  | +              | +                |          |
| в 20%-ной соляной кислоте            | +                  | +              | +                | -        |
| в каустической соде                  | +                  | +              | +                | -        |
| в морской воде                       | +                  | +              | +                | -        |

**Примечание.** Знак «+» — стойкие трубы, «-» нестойкие.

Диаметр полиэтиленовых труб для воды может колебаться от 20 до 500 мм. Трубы диаметром от 20 до 110 ММ поставляются в бухтах.

Для соединения полиэтиленовых труб диаметром обычно до 110 мм применяют специальные соединительные детали – *фитинги* в виде муфт, тройников, отводов, фланцев и др.

Трубы большого диаметра сваривают с помощью специальных сварочных аппаратов.

Полиэтиленовые трубы применяют не только для водоснабжения, но и для систем канализации. Канализационные трубы выпускают с гофрированными наружными стенками длиной 6 или 12 м. Монтаж труб для безнапорной канализации осуществляется посредством раструба с уплотнительным кольцом.

Полиэтиленовые трубы могут использоваться также для прокладки кабелей, подземных трубопроводов оросительных систем, для дренажа, систем газоснабжения и др.

*Металлополимерные трубы* – многослойные изделия, внутренняя и внешняя поверхности которых изготовлены из полиэтилена, между которым проложен слой алюминиевой фольги, толщиной 0,5-2,0 мм. Материал рассчитан на интервал температур 40-95 °С. Трубы выпускаются диаметром 16-63 мм в бухтах 50-200 м. Металлополимерные трубы легко режутся, гнутся, соединяются сваркой.

*Полипропиленовые трубы* более теплостойкие чем полиэтиленовые и могут эксплуатироваться до 95°С. В то же время они хуже сопротивляются действию низких температур и могут работать при температуре не ниже -15°С. Полипропиленовые трубы предназначены в основном для использования во внутренних системах холодного и горячего водоснабжения.

*Поливинилхлоридные трубы (винипластовые)* изготавливают на основе латексного или суспензионного поливинилхлорида с добавкой стабилизатора. Внутренний диаметр труб – 5-250 мм. Они могут быть безнапорными или напорными, рассчитанными на давление до 0,6 МПа.

По прочности поливинилхлоридные трубы превосходят полиэтиленовые. Предел прочности их при растяжении достигает 20 МПа, относительное удлинение – 160-180%. Трубы легко свариваются и склеиваются, поддаются механической обработке.

Основной недостаток поливинилхлоридных труб – малая теплостойкость. Нагрев выше 60-65°C вызывает их размягчение. Эксплуатационные качества поливинилхлоридных трубопроводов при отрицательных температурах резко снижаются. Сопротивление удару также резко снижается при наличии на трубах царапин и надразов.

*Стеклопластиковые трубы* изготавливают на основе стекловолокна, стекложута, а также стеклотканей и полиэфирных, эпоксидных или фенолформальдегидных полимеров различными методами (намоткой, непрерывной протяжкой и др.). Они имеют длину 5-6 м, диаметр 30-300 мм при толщине стенок 2-10 мм. Трубы способны выдерживать температуру до 150°C. Механические свойства стеклопластиковых труб выше, чем других видов полимерных труб, они легко поддаются механической обработке. Применяют стеклопластиковые трубы для трубопроводов в нефтяной, химической и горнодобывающей промышленности.

*Трубы из органического стекла* получают на основе листового полиметилметакрилата способом сварки предварительно размягченных заготовок. Трубы применяют для транспортирования жидкостей на предприятиях пищевой, фармацевтической, химической и других отраслях промышленности.

### 14.4. Полимерные клеи, мастики и бетоны

В отдельную группу полимерных материалов входят полимерные (синтетические) клеи, мастики и бетоны, которые в отличие от пластмасс используются в вязкожидком или пластичном состоянии.

**Полимерные клеи и мастики.** Полимерные клеи в строительстве используют для соединения конструкционных материалов и отдельных деталей сборных изделий (балки, оконные блоки, стеновые и кровельные панели, щитовые двери и т.п.). Их применяют также при отделке зданий современными декоративно-отделочными материалами, для монтажа и ремонта санитарно – технических систем и др. Мастики отличаются от клеев повышенной вязкостью и значительным содержанием наполнителей. В зависимости от области применения мастик в строительстве их разделяют на склеивающие, гидроизоляционные, герметизирующие, шпаклевочные и футеровочные.

Склеивание материалов основано на *адгезии* – способности к прилипанию двух разнородных жидких или твердых тел в результате межмолекулярного взаимодействия. При контакте двух тел возникают молекулярные силы трех видов: дисперсионные, индукционные и электростатические. Дисперсионные силы являются результатом взаимной поляризации молекул за счет непрерывного движения электронов; индукционные возникают в результате образования наведенных диполей, а электростатические являются результатом взаимодействия полярных молекул. Особым видом электростатической связи является водородная связь, устанавливаемая водородом между двумя электроотрицательными атомами. Энергия водородной связи обычно больше энергии других видов связей, возникающих при межмолекулярном взаимодействии, но меньше энергии химических валентных связей.

Кроме адсорбционной теории, рассматривающей образование связи между клеящим веществом (адгезивом) и склеиваемым материалом (субстратом) как результат действия межмолекулярных сил, предложены также электрическая (Б.В. Дерягин, Н.А. Кротова) и диффузионная (С.А. Воюцкий) теории адгезии. В основе первой лежат представления о двойном электрическом слое, образующемся при тесном контакте двух поверхностей, второй – диффузия цепных молекул или их участков.

Для объяснения адгезии полимеров к металлам предложена химическая теория, основанная на образовании между адгезивом и субстратом химических связей. Ни одна из теорий в отдельности не может объяснить все многообразие явлений, возникающих при склеивании и их рационально рассматривать в комплексе.

Силы адгезии проявляются лишь при максимальном сближении двух тел. Необходимым условием склеивания является также способность клея хорошо смачивать твердые поверхности. Полнота смачивания зависит от вязкости клея, прилагаемого давления и состояния поверхности.

Наряду с адгезией склеивание двух тел характеризуется *когезией*, определяющей прочность самой клеевой прослойки. Адгезионные и когезионные свойства высокомолекулярных соединений зависят от их структуры, химического состава и молекулярной массы (рис. 14.23, 14.24). Установлено, в частности, положительное влияние на клеящие свойства полимеров наличие функциональных

#### 14. Полимерные материалы

групп с высокими значениями энергии когезии (табл. 14.12). Существенное влияние на прочность склеивания оказывает толщина клеевой прослойки (рис. 14.27).

Таблица 14.12

Энергия когезии различных органических групп

| Группа              | Энергия когезии кДж/моль | Группа                           | Энергия когезии кДж/моль | Группа             | Энергия когезии кДж/моль |
|---------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|
| - CH <sub>2</sub> - | 4,16                     | - CHO                            | 19,74                    | - OH               | 30,45                    |
| = CH <sub>2</sub>   | 7,48                     | - OOCCH <sub>3</sub>             | 23,52                    | - COOH             | 37,66                    |
| - Cl                | 14,28                    | -OOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> | 26,17                    | -CONH <sub>2</sub> | 55,44                    |
| - NH <sub>2</sub>   | 14,83                    | - NO <sub>2</sub>                | 30,24                    | - CONH             | 68,04                    |
| > CO                | 17,93                    |                                  |                          |                    |                          |

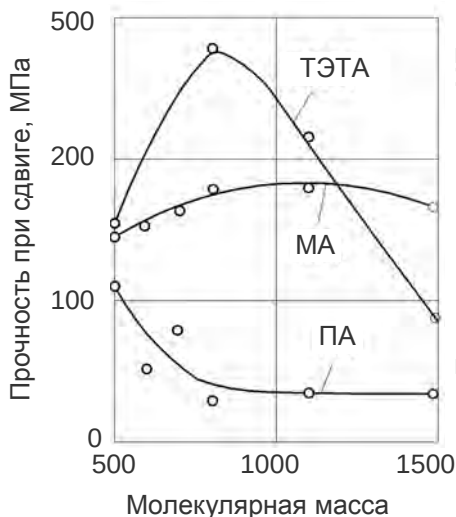


**Рис. 14.23.** Влияние молекулярной массы на клеящие свойства эпоксидных полимеров, полученных с различными отвердителями: ПА – полиэтиленполиамин; МА – малеиновый ангидрид; ТЭТА – триэтилентетрамин

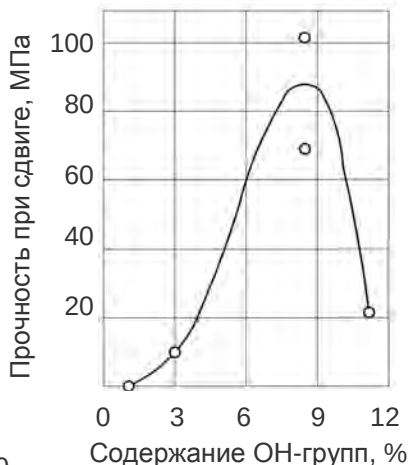


**Рис. 14.24.** Влияние содержания гидроксильных групп на клеящую способность полиуретанов



Хорошими клеящими свойствами обладают феноло- и мочевиноформальдегидные полимеры, эпоксисоединения, карбоксилсодержащие эластомеры, другие соединения, содержащие функциональные группы с высокими значениями энергии когезии.

Полимеры с высокой молекулярной массой плохо растворимы, имеют слишком высокую температуру плавления и, обладая хорошей когезией, не имеют, как правило, удовлетворительных адгезионных свойств. Для каждого класса полимеров имеются некоторые оптимальные значения степени полимеризации (или поликонденсации), при которых наблюдаются лучшие адгезионные свойства наряду с достаточно хорошей когезионной прочностью. Например, лучшие клеящие свойства для эпоксидных полимеров установлены при молекулярной массе 600-1100, поливинилацетата 5000-17000, полиамида 12500-25000.

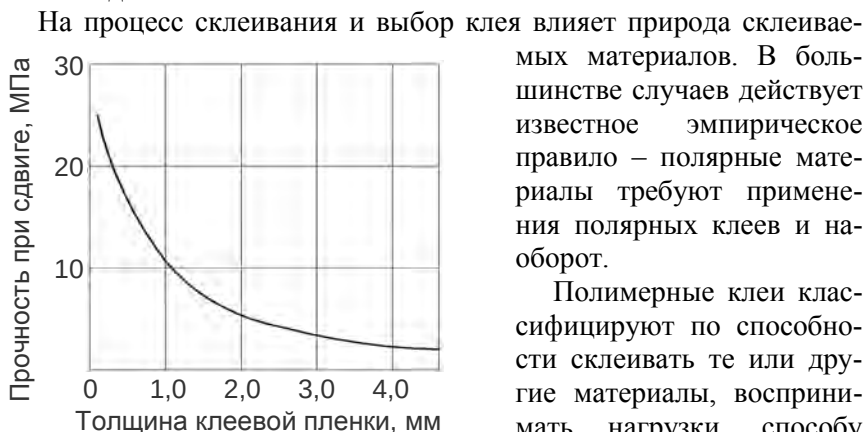


**Рис. 14.25.** Зависимость прочности склеивания стали полиметилметакрилатом от толщины клеевой пленки

Наиболее приемлемой является классификация клеев по химической природе и свойствам полимерных связующих. В основе этой классификации лежит разделение клеев по химической природе и свойствам полимерных связующих. Полимерные клеи разделяют на три группы:

- 1) на основе термопластических полимеров;
- 2) на основе термореактивных полимеров;
- 3) на основе эластомеров – каучукообразных полимеров.

Из термопластичных полимеров для получения клеев нашли применение полиамиды, поливинилацетат, перхлорвинил, полиакрилаты, полиизобутилен. Клеевые соединения на основе термопластичных полимеров характеризуются сравнительно невысокой теплостойкостью, ползучестью под нагрузкой и используются в основном для несилевых соединений неметаллических материалов.

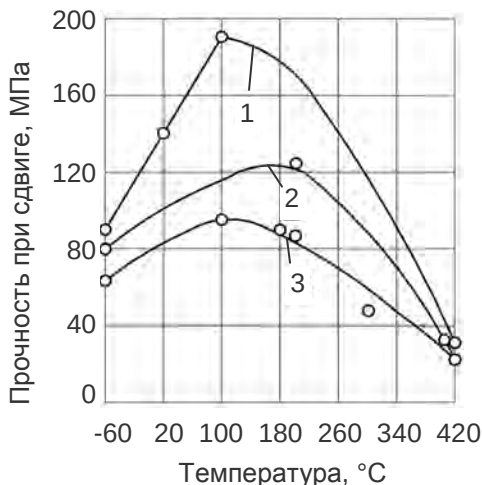


**Рис. 14.26.** Клеящие свойства резолла и новолачных смол, отвержденных формальдегидом и гексаметилентетрамином:

- 1 — новолачная смола, отвержденная формальдегидом; 2 — новолачная смола, отвержденная гексаметилентетрамином; 3 — резол

Из термореактивных полимеров для синтетических клеев наибольшее распространение получили эпоксидные, фенолоформальдегидные, полиэфирные, полиуретановые, кремнийорганические и фуриловые смолы. Ряд клеев на основе термореактивных полимеров образует прочные и теплостойкие соединения, которые можно применять в силовых конструкциях как из металлов, так и неметаллических материалов. Клеящие свойства термореактивных полимеров существенно зависят от вида и содержания *отвердителей* (рис. 14.26, 14.27).

Состав и свойства некоторых характерных клеев на основе термопластичных

и термореактивных полимеров приведен в табл. 14.13.

Каучуковые клеи дают эластичные клеевые соединения, хорошо сопротивляющиеся ударным нагрузкам, вибрации, действию воды и масел. Для их получения используют растворы каучука или смесей каучука и синтетических смол в органических растворителях.

Таблица 14.13

Состав и свойства некоторых синтетических клеев

| Клей               | Состав, % по массе                                                                                                           | Техническая характеристика                                                   |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Поливинилхлоридный | Поливинилхлорид – 10<br>Метиленхлорид – 61,5<br>Циклогексанон – 13,5<br>Каолин – 15                                          | Предел прочности на сдвиг через 3 сут. – 0,44-0,5 МПа                        |
| Латексный          | Латекс СКС-65ГП-92<br>Сульфат натрия – 3<br>Каолин – 15                                                                      | Предел прочности на отрыв через сутки 0,2-0,34 МПа, через 10 сут. – 0,55 МПа |
| Клей "Бустилат-Н"  | Карбоксиметилцеллюлоза – 2,3<br>Латекс СКС-50 или СКС-65ГП – 15,7<br>Мел – 13-18<br>Соль – 4,9<br>Вода- 100                  | Предел прочности на сдвиг через 3 сут. – 0,15-0,3 МПа                        |
| Клей АДМК          | Акриловая дисперсия- 20<br>Карбоксиметилцеллюлоза- 10<br>Раствор канифоли в ксилоле – 10<br>Раствор соды – 10<br>Каолин – 50 | Предел прочности на отрыв через 24 ч. – не менее 0,15 МПа                    |
| Клей К-17          | Карбамидоформальдегидная смола – 82<br>Древесная мука – 5<br>10%-ный раствор щавелевой кислоты – 13                          | Предел прочности на отрыв через 10 сут. – не менее 0,5 МПа                   |

Кроме основного компонента – синтетического полимера – в состав клеев могут вводиться наполнители в виде тонкодисперсных или волокнистых минеральных и органических веществ. Наполнители вступают в контакт с функциональными группами полимеров, адсорбирующихся на их поверхности и образующих тончайшие оболочки с упорядоченной структурой макромолекул. Введение наполнителей позволяет компенсировать внутренние напряжения в клеевых прослойках, уменьшить их усадку, регулировать вязкость,

электро- и теплопроводность и уменьшить стоимость клеев. Из природных минеральных наполнителей наиболее часто применяют кварцевые пески и мел. Эффективными искусственными наполнителями являются алюминиевая пудра и портландцемент. В качестве наполнителей применяют также тонкомолотый каменный уголь, древесную муку и др.

В состав клеевых композиций при необходимости вводят также растворители, пластификаторы, отвердители, вулканизирующие агенты, ингибиторы и стабилизаторы. В качестве растворителей клеев обычно применяют ацетон, этиловый спирт, метилхлорид, дихлорэтан, уайт-спирит и другие органические вещества. Поскольку наличие растворителя приводит к порообразованию при отверждении, снижению прочности и герметичности клеевой прослойки, его содержание в клеевых составах принимается минимально возможным.

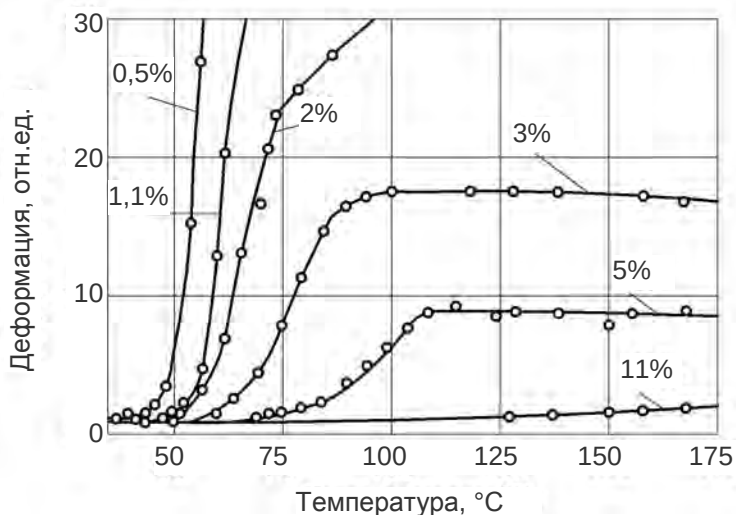


**Рис. 14.27.** Влияние содержания уротропина на отверждение феноло-формальдегидных олигомеров

При значительном содержании наполнителей и повышенной вязкости клеевые композиции относят к *мастикам*. Если расход клеев составляет  $0,1-0,4 \text{ кг/м}^2$ , то расход склеивающих мастик со-

Часть II. Характеристика основных строительных материалов  
ставляет  $1-1,5 \text{ кг/м}^2$ . В зависимости от температуры при применении мастики делят на горячие и холодные.

Из склеивающих мастик получили распространение мастики на основе инден-кумароновых, эпоксидных, полиэфирных, фуриловых и других полимеров. Применяют также мастики на основе битумно-полимерных связующих.

Для заделки стыков строительных конструкций, плит дорожных и аэродромных покрытий, труб, уплотнения швов резервуаров и других сооружений применяют *герметизирующие* мастики (рис. 14.28).

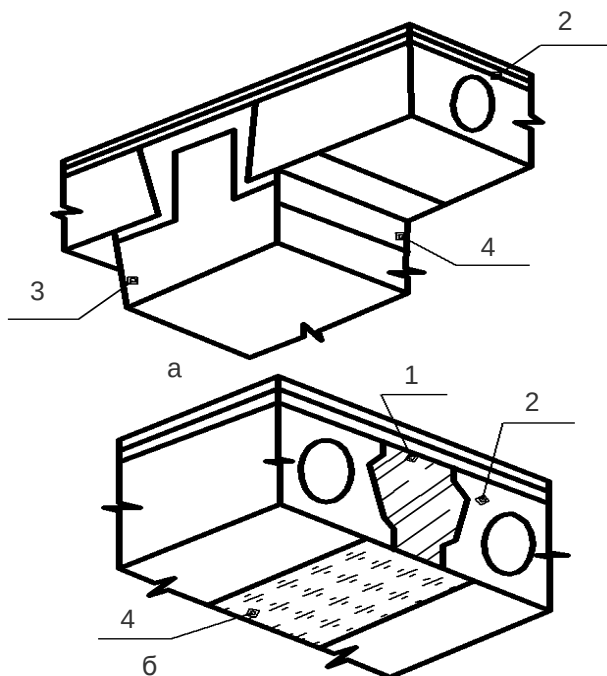


**Рис. 14.28.** Герметизация стыков элементов перекрытия:  
а – герметизация мест опирания панелей перекрытия на  
ригель; б – герметизация стыков плит перекрытия;  
1 – цементно-песчаный раствор; 2 – панель перекрытия;  
3 – ригель; 4 – мастика

Качество герметизирующих мастик (герметиков) зависит от их адгезионной способности, проницаемости, стойкости к агрессив-

ным факторам окружающей среды, относительного удлинения. Мasticные герметики выпускают трех видов: нетвердеющие, холодного и горячего отверждения. Из нетвердеющих герметиков распространены мастики на основе полиизобутилена. В жидкоэластичную фазу мастик входит полиизобутилен, регенерированная резина, минеральное масло, в твердую – тонкомолотый каменный уголь и другие наполнители. Из герметизирующих мастик холодного отверждения распространены мастики на основе тиоколов (полисульфидных каучуков). Их поставляют обычно в виде отдельных составных частей – герметизирующей и вулканизирующей паст и ускорителя. После смешивания компонентов в требуемой пропорции мастики вулканизируются и превращаются в резиноподобный материал. К мастикам горячего отверждения относятся бутилкаучуковые, силиконовые, эпоксидные, битумно-полимерные мастики.

Для лучшего заполнения зазоров и сохранения теплозащитных свойств ограждений наряду с обычными применяют вспенивающиеся и расширяющиеся герметики.

*Шпаклевочные* мастики применяют для выравнивания и устранения дефектов (трещин, раковин, пор) в поверхностях конструктивных материалов, предназначенных для отделки. Мастики этого вида, кроме необходимых адгезионных свойств, должны обладать способностью хорошо заполнять зазоры, не давать усадку при отверждении, образовывать ровную твердую поверхность, обладающую необходимым сцеплением с материалами последующей отделки. Лучшим полимерным связующим для шпаклевочных мастик являются эпоксидные смолы. Повышенной теплостойкостью (до 180°C) по сравнению с эпоксидными обладают полиуретановые мастики. Для выравнивания бетонных и деревянных поверхностей под окраску применяют перхлорвиниловые, глифталевые и другие мастики.

Для защиты химических емкостей, аппаратов, трубопроводов, стен и полов в условиях воздействия агрессивных сред применяют *антикоррозионные* и *футеровочные* мастики. Состав таких мастик выбирается с учетом конкретных условий работы защищаемого объекта, особенностей агрессивной среды.

**Полимерные бетоны.** К полимерным относят бетоны, вяжущими в которых служат синтетические полимеры. Полимерные бетоны (полимербетоны) входят в т.н. группу П-бетонов – бетонов

с добавками полимеров или на их основе. Кроме них, в эту группу входят *полимерцементные* и *полимерсиликатные* бетоны, а также *бетонополимеры*. По своим свойствам полимерные бетоны занимают промежуточное место – между пластмассами и цементными бетонами. Так же как и цементные полимербетоны классифицируют по плотности, особенностям структуры и назначению (рис.14.29). Кроме того, полимербетоны классифицируют по виду связующих. Для рассматриваемой группы материалов, которые отличаются от других пластмасс высоким содержанием минеральных наполнителей и заполнителей, в качестве связующих применяют в основном термореактивные полимеры – карбамидные, фенольные, полиэфирные, фурановые, полиуретановые, эпоксидные. В значительно меньшей степени применяют термопластичные полимеры – инден-кумароновые, метилакрилатные, перхлорвиниловые. Наибольшее применение находят фурановые, полиэфирные и карбамидные смолы.

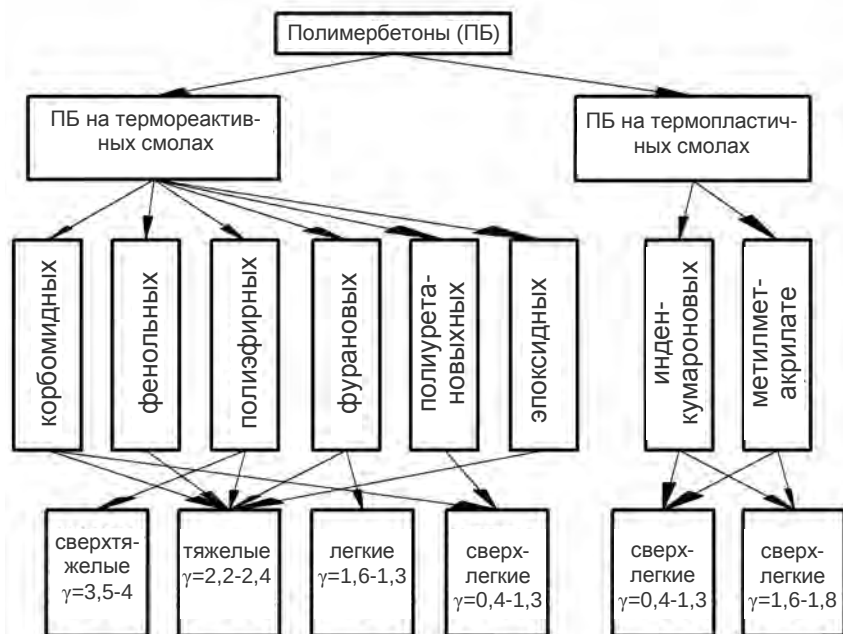


Рис. 14.29. Классификация полимербетонов

Отверждение полимербетонов на основе термореактивных смол осуществляется при обычной температуре, а иногда с подогревом и, как правило, при введении отвердителей.

Как связующее для полимербетонов распространение получил фурфуролацетоновый мономер (ФА) – жидкость с температурой кипения 160-240°C, нерастворимая в воде, но растворимая в кетонах, сложных эфирах и т.д. Отверждение мономера ФА и других фурановых смол (ФАМ, 2ФА, 4ФА, и др.) происходит в присутствии сульфокислот, сульфохлоридов и др.

Обязательным требованием к заполнителям на основе фурановых смол является их длительная стойкость в кислой среде, учитывая присутствие в полимербетоне кислого отвердителя. Использование заполнителей, реагирующих с кислотами (известняки, доломиты, асбест и др.), недопустимо. Для полимербетонов на полиэфирных и эпоксидных смолах основность заполнителя не имеет решающего значения.

Существенное влияние на свойства полимербетонов оказывают наряду с заполнителями дисперсные минеральные наполнители. Наполнители способны к сравнительно интенсивному адсорбционному и адгезионному взаимодействию с синтетическими полимерами, что открывает возможности регулирования свойств полимербетонов. Так, введение углеродсодержащих наполнителей (до 5%) в композиции на основе мономера ФА существенно повышает их водо- и морозостойкость. Такие наполнители как андезит, кварцевая мука и др. взаимодействуют с функциональными группами полиэфирных смол, образуя ковалентные или водородные связи, способствуют повышению прочности. Для образования химических связей на границе раздела фаз полимер-наполнитель используют адсорбционное модифицирование, т.е. изменение молекулярных свойств поверхности наполнителей введением ПАВ. Для каждого вида синтетического полимера существует строго определенная степень наполнения и величина удельной поверхности наполнителя, обеспечивающие максимальную прочность материала.

В качестве крупного заполнителя в состав полимербетонов вводят щебень, гранулометрический состав которого подбирается исходя из условий плотной упаковки, размеров и формы изделий и конструкций.



Распространенные составы полимербетонов на основе мономера ФА приведены в табл. 14.14.

Расчеты составов полимербетонов можно выполнять, представив их как двухкомпонентную систему: наполненная полимерная мастика - крупный заполнитель.

Расход минимально необходимого количества полимерного связующего для мастики по В.В. Патурову можно найти по формуле:

$$П_m = \frac{S_n m_n \rho_n \delta}{100}, \quad (14.2)$$

где  $П_m$  – расход полимерного связующего для мастики, кг;  $S_n$  – удельная поверхность наполнителя,  $m^2/kg$ ;  $m_n$  – масса наполнителя, кг;  $\rho_n$  – плотность связующего,  $kg/dm^3$ ;  $\delta$  – толщина пленки связующего ( $\delta \approx 15 \cdot 10^{-7}$  м).

Таблица 14.14

Примерные составы полимербетонов на мономере ФА  
(по данным В.В. Патурова)

| Составляющие                   | Состав, % по массе |      |      |      |      |
|--------------------------------|--------------------|------|------|------|------|
|                                | 1                  | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Щебень:                        |                    |      |      |      |      |
| гранитный                      | 51                 | -    | -    | -    | -    |
| кварцевый                      | -                  | 52   | -    | -    | -    |
| андезитовый                    | -                  | -    | 50   | -    | -    |
| аглопоритовый                  | -                  | -    | -    | -    | 38   |
| из кислотоупорной керамики     | -                  | -    | -    | 35   | -    |
| Песок:                         |                    |      |      |      |      |
| кварцевый                      | 25,5               | -    | -    | -    | -    |
| графитовый                     | -                  | -    | -    | 30,4 | 28,3 |
| Мука:                          |                    |      |      |      |      |
| кварцевая                      | 11                 | -    | -    | -    | -    |
| андезитовая                    | -                  | 33,6 | 35,6 | -    | -    |
| графитовая                     | -                  | -    | -    | 13   | 15   |
| Мономер ФА или его модификации | 10,6               | 12   | 12   | 18   | 15,5 |
| Бензосульфокислота (БСК)       | 2                  | 2,4  | 24   | 3,6  | 3,2  |

По данным различных исследователей *прочность* полимербетонов на сжатие на фурановых полиэфирных и эпоксидных смолах колеблется в интервале 50-125, на изгиб 15-40 и растяжение 8-16 МПа.

Применяют два способа отверждения полимербетонов: “на холоду”, т.е. при обычных температурах и при подогреве до 40...80°C. В первом случае материал достигает требуемой прочности через несколько дней, в другом уже через несколько часов после укладки.

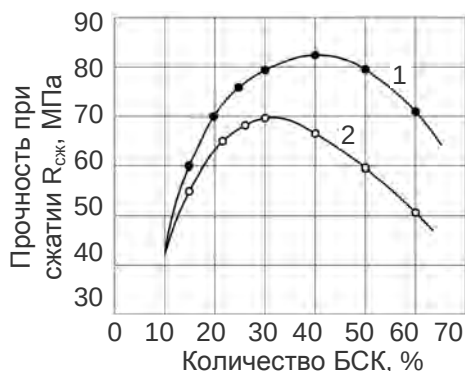


**Рис. 14.30.** Влияние количества бензолсульфокислоты (БСК) на прочность полимербетона ФАМ: 1 — в стабильных температурно-влажностных условиях; 2 — после выдерживания в течение 28 сут. в морской воде

В интервале температур до 100° предел прочности и модуль упругости уменьшаются пропорционально повышению температуры. Для полимербетонов на мономере ФА с увеличением температуры от 20 до 100°C прочность и модуль упругости снижаются на 40%. При дальнейшем увеличении температуры прочность и модуль упругости уменьшаются более интенсивно. Существенное влияние на прочность оказывают содержание отвердителя и условия отверждения полимерного связующего, длительность твердения (рис. 14.30, 14.31).

Большое различие в значениях коэффициента температурного расширения полимера и минеральных компонентов (в 5-10 раз) приводит к возникновению значительных местных напряжений на границе раздела фаз при изменении температуры. Максимальная температура эксплуатации изделий и конструкций из полимербетона 150-180°C.

Полимербетоны по сравнению с бетонами на неорганических вяжущих имеют более высокую усадку, ползучесть (рис. 14.32), чувствительность к температурным перепадам, а также более низкие значения модуля упругости. Линейная усадка фурановых полимербетонов достигает до 1 мм/м, практически прекращаясь через

6-7 сут. при отверждении в нормальных условиях и через 1-2 сут. при прогреве. В полимербетонах на полиэфирных смолах усадка примерно такая же, как и при применении мономера ФА, а на эпоксидных близка к усадке обычных цементных бетонов.

Ползучесть полимербетонов при нормальной температуре начинает проявляться под нагрузкой, величина которой составляет 40-50% от разрушающей, а при 60-90°C – под нагрузкой в 4 раза меньшей.

При применении полимербетонов необходимо учитывать повышенное тепловыделение, имеющее место при отверждении термореактивных смол. Увеличение расхода связующего до 12-14% во многих случаях приводит к появлению трещин.

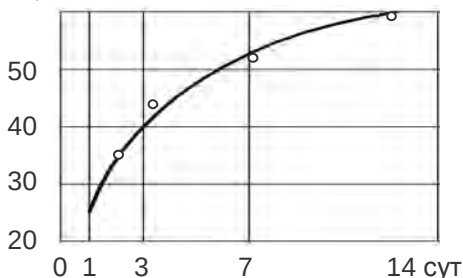


**Рис. 14.31.** Зависимость предела прочности при сжатии эпоксидного полимербетона от времени хранения (температура 20°C)

Ненаполненный полимер ФА имеет недостаточную водо- и морозостойкость. Введение наполнителей и в особенности графитового существенно улучшает эти свойства.

Коэффициенты водо- и морозостойкости полимербетонов оптимальных составов достигают до 0,85-0,90 соответственно после пребывания в воде 1 мес. и через 100 циклов замораживания и оттаивания. Практически полностью водостойкими и высокоморозостойкими являются композиции на основе эпоксидных смол.

Положительными особенностями полимерных бетонов являются их высокая *износостойкость* и ударная прочность. Сопротивление истиранию полимербетонов в зависимости от вида полимерных связующих изменяется от 0,001 до 0,04 г/см<sup>2</sup>. По данным И.М. Елшина и В.Б. Резника сопротивление истиранию полимербетонов на мономере ФА и кварцевых заполнителях в 2-5 раз, а на гранитных заполнителях в 20-25 раз выше, чем для цементного бетона. Ударная прочность полимербетонов в 5-10 раз выше, чем у цементных.

Одна из важных особенностей полимерных бетонов – высокая химическая стойкость. Коэффициент стойкости в кислотах этих материалов достигает 0,8 и выше после 12-месячного испытания. С

#### 14. Полимерные материалы

повышением концентрации кислот коэффициент стойкости полимербетонов, как правило, повышается, что можно объяснить уменьшением количества воды в растворах и соответственно снижением эффекта адсорбционного понижения прочности.

Полимербетоны сочетают высокую химическую стойкость с прочностью и долговечностью, что открывает возможность использования их как конструкционного материала при воздействии химически агрессивных сред. Высокая плотность этого материала в сочетании с хорошим сцеплением его со стальной арматурой позволяет изготавливать сталеполимербетонные конструкции широкой номенклатуры.

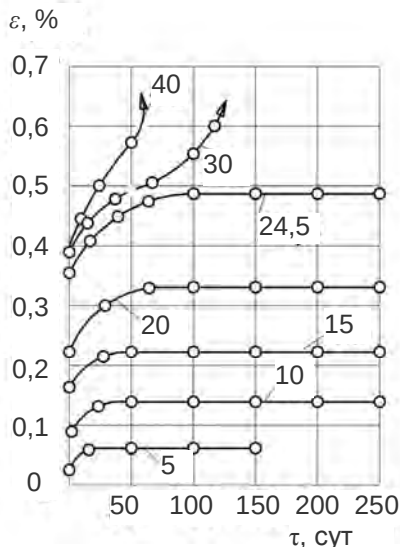


**Рис. 14.32.** Кривые ползучести при сжатии образцов-призм из полимербетона ФАМ. Цифры на кривых – нагрузка, МПа

Наибольший экономический эффект достигается при использовании несущих химически стойких сталеполимербетонных конструкций на промышленных предприятиях с агрессивным воздействием различных технологических сред.

Имеется положительный опыт применения полимербетонов для износоустойчивых облицовок гидротехнических сооружений. Цементные бетоны без защитных облицовок из чугуна, стали, гранита и т.п. плохо противостоят действию донных наносов. Полимербетонные покрытия хорошо сохраняются в чрезвычайно тяжелых условиях эксплуатации износо- и кавитационно-стойких защитных облицовок.

Полимербетоны успешно используют для изготовления шахтных стволов, кольцевых коллекторов подземных сооружений, химически стойких и дренажных труб, траверс ЛЭП, контактных опор с высоким электросопротивлением. Расширяется производство изделий из искусственного отделочного камня с применением полиэфирных смол и декоративной каменной крошки.

## 15. ЛАКОКРАСОЧНЫЕ И ОКЛЕЕЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Лакокрасочные материалы – вещества, способные при нанесении тонким слоем на поверхность отвердевать, образуя пленку, хорошо сцепляющуюся с основанием. Пленка может быть бесцветной или окрашенной, прозрачной или непрозрачной.

Лакокрасочные покрытия выполняют декоративную, санитарную и защитную функции. Декоративная функция состоит в архитектурно-художественной отделке зданий, санитарная – в обеспечении в помещениях необходимого санитарного состояния, защитная – в защите конструкций от коррозии, загнивания, загорания, впитывания влаги и т.п.

### 15.1. Классификация и свойства

Важнейшими компонентами лакокрасочных материалов являются пленкообразующие или связующие вещества, растворители и пигменты. Кроме того, в состав их могут входить наполнители, пластификаторы, сиккативы, эмульгаторы и прочие добавки.

*Лак* – раствор пленкообразующих веществ в органическом растворителе или воде, который после высыхания образует прозрачную пленку.

*Краска* – суспензия пигмента или смеси пигментов с наполнителями в пленкообразующем веществе, образующая после высыхания непрозрачную пленку.

*Эмаль* – суспензия пигмента или смеси пигментов с наполнителями в лаке, образующая после высыхания непрозрачную блестящую пленку. Эмали по сравнению с красками содержат меньшее количество наполнителя.

Типичная схема многослойного покрытия (рис. 15.1) включает такие составляющие: грунтовку – один слой; шпаклевку – один или несколько слоев; эмаль (краску) – несколько слоев; лак – один слой. Последовательность нанесения материалов, как правило, сохраняется, но отдельные составные элементы покрытия могут не использоваться. Например, если поверхность окрашиваемого материала довольно ровная, без существенных дефектов, а к декоративности

## 15. Лакокрасочные и оклеечные материалы

покрытия не предъявляется повышенных требований, отпадает необходимость в использовании шпаклевки и лака.

Лакокрасочные материалы классифицируют: по виду пленкообразующих веществ (масляные, глифталевые, эпоксидные, известковые, силикатные и др.); по виду жидкой фазы (водные и безводные); по отношению к действию воды (водостойкие и неводостойкие); по преимущественному назначению (химически стойкие, термостойкие, электроизоляционные и т.п.).

Для обозначения малярных смесей применяют буквенно-цифровую систему, которая состоит из пяти знаков. Первый знак определяет группу смеси (краска, лак, эмаль, грунтовка, шпаклевка), второй (две больших буквы) – пленкообразующее вещество (табл. 15.1), третий – основное назначение смесей, четвертый – порядковый номер, присвоенный данной смеси (для масляных красок вместо порядкового номера приводят цифру, обозначающую название олифы, на которой изготовлена краска; 1 – натуральная, 2 – оксоль, 3 – глифталевая, 4 – пентафталевая, 5 – комбинированная).



**Рис. 15.1.** Схема последовательного нанесения слоев лакокрасочного покрытия:

1 – пористая подкладка (например, бетон); 2 – грунтовый слой; 3 – шпаклевочный слой; 4 – несколько слоев лакокрасочного покрытия; 5 – верхний слой контактирующий с внешней средой (например, лаковый)

Примеры обозначения лакокрасочных материалов: Краска МА-025 зеленая (МА – масляная, 0 – густотертая, 2 – группа смеси по назначению, 5 – олифа комбинированная); эмаль ХВ-113 голубая (ХВ – на перхлорвиниловой эмали, 1 – группа смеси по назначению, 13 – порядковый номер); лак ГФ-01 (ГФ – на глифталевых смолах, О – полуфабрикатный, 1 – порядковый номер); Грунтовка АС-071 белая (АС – на алкидно-акриловых смолах, О – грунтовка, 71 – порядковый номер).

Классификация малярных смесей по условиям эксплуатации покрытия

| Смеси                        | Обозначение | Преимущественное назначение по условиям эксплуатации покрытия                                                                                                                                                 |
|------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Атмосферостойкие             | 1           | Покрyтия, стойкие к атмосферным влияниям в разных климатических условиях, эксплуатируемые на открытых площадках                                                                                               |
| Ограниченно атмосферостойкие | 2           | Покрyтия, которые эксплуатируются под навесом и внутри неотапливаемых и отапливаемых помещений                                                                                                                |
| Консервационные              | 3           | Покрyтия, используемые для временной защиты окрашиваемой поверхности в процессе производства, транспортирования и хранения изделий. Покрyтия, стойкие к действию пресной воды и ее пара, а также морской воды |
| Специальные                  | 5           | Покрyтия, имеющие специфические свойства: стойкие к рентгеновским и другим излучениям, светящиеся, терморегулирующие, противообрастающие, для окраски резины, пластмасс и др.                                 |
| Маслобензостойкие            | 6           | Покрyтия, стойкие к действию минеральных масел и консистентных смазок, бензина, керосина и других нефтяных продуктов, содержащих не более 20% ароматических веществ                                           |
| Химически стойкие            | 7           | Покрyтия, стойкие к действию кислот, щелочей и других жидких химических реагентов и их пара                                                                                                                   |
| Термостойкие                 | 8           | Покрyтия, стойкие к действию повышенных температур                                                                                                                                                            |
| Электроизоляционные          | 9           | Покрyтия, на которые действуют электрические напряжения, электрическая дуга и поверхностные разряды                                                                                                           |

К основным свойствам материалов для малярных работ относят цвет, блеск, свето-, щелоче- и кислотостойкость, атмосферостойкость, стойкость к действию сероводорода, красящую способность,

укрывистость, время и степень высыхания, условную вязкость, прочность покрытия на изгиб, степень перетирания и др.

*Цветовая характеристика* лакокрасочных материалов определяется по цветовому тону, насыщенности и светлости. Под *блеском* понимают способность поверхности направленно отражать световой поток. Его определяют фотоэлектрическим методом.

Для установления *светостойкости*, характеризующейся изменением цвета лакокрасочных материалов, их облучают источниками искусственного освещения или ультрафиолетовыми лучами на протяжении заданного интервала времени. В отличие от светостойкости *атмосферостойкость* характеризует способность покрытия оказывать сопротивление разрушительному действию солнечных лучей, дождя, мороза и других атмосферных факторов. Атмосферостойкость оценивают по изменению декоративных и защитных свойств покрытий после выдерживания в атмосферных условиях.

*Щелочестойкость* устанавливают обычно для пигментов, помещая их в 5%-ный раствор каустической соды и сравнивая через 2 ч цвет порошков с цветом эталонных пигментов.

*Кислотостойкость* и *стойкость к действию сероводорода* определяют по изменению внешнего вида и защитных свойств лакокрасочных покрытий после действия соответствующих реагентов на протяжении заданного времени.

*Красящая способность* (интенсивность) – свойство цветного пигмента при смешивании с белым сохранять свой цветовой тон. Ее определяют визуальным и фотоэлектрическим методами по отношению минимально необходимой массы цветного пигмента к единице массы белого пигмента, при котором еще сохраняется цветовой тон.

*Укрывность* определяется в граммах пигмента или краски, необходимых чтобы сделать невидимым цвет окрашиваемой поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>. Величину обратную укрывистости называют *кроющей способностью*.

Различают семь *степеней высыхания* лакокрасочного покрытия, определяемых при температуре 20±2°C и соответствующей влажности воздуха 65±5% на трех окрашенных пластинках.

В технических требованиях к лакокрасочным материалам, применяемым в строительстве, обычно приводят время высыхания до степени 1 (“от пыли”) и до степени 3 (“полное”). Время высыхания



до степени 1 наступает, если при испытании стеклянные шарики массой 0,5 г, насыпаемые с высоты 30-50 мм, через 60 с легко удаляются с поверхности образца мягкой кистью без повреждений покрытия. Для определения времени высыхания до степени 3 используют гирю массой 200 г.

## 15.2. Характеристика основных компонентов

Основными компонентами лакокрасочных материалов являются связующие, пигменты, наполнители и растворители или разбавители.



**Рис. 15.2.** Классификация материалов для приготовления малярных составов

Классификация материалов для приготовления малярных составов приведена на рис. 15.2.

*Связующие (пленкообразующие) вещества* лакокрасочных материалов должны обладать способностью создавать пленки на отделяемой поверхности, с требуемыми свойствами. Лакокрасочные материалы можно получать на основе органических (масла, полимеры, каучуки) а также неорганических (известь, цементы, жидкое стекло) связующих (пленкообразующих) веществ.

Большинство органических связующих веществ – это олигомерные или высокомолекулярные соединения. Их разделяют на три основных группы:

- 1) полимеризационные, получаемые реакцией полимеризации;
- 2) поликонденсационные, получаемые реакцией поликонденсации;
- 3) природные, получаемые переработкой природных продуктов.

К первой группе связующих принадлежат полимеры виниловых соединений (перхлорвиниловые, полиакриловые, поливинилацетатные, сополимеры винилхлорида, стирола), полиуретаны, ненасыщенные полиэферы, производные полиэтилена, хлоркаучуковые полимеры, кумарон-инденовые смолы, дивинил-ацетиленовые полимеры и т.п.

Вторая группа – поликонденсационные связующие – содержит фенолформальдегидные, мочевино- и меламиноформальдегидные, эпоксидные смолы, полисульфиды, полиамиды и т.п.

К третьей группе принадлежат продукты переработки растительных масел и жиров, различных смол (канифоль, шеллак, копалы, битумы, асфальты), водорастворимые животные клеи, казеин и т.п.

Свойства полимерных связующих существенным образом зависят от вида функциональных групп, входящих в состав их молекул.

*Пигменты* (сухие краски) – цветные высокодисперсные минеральные или органические вещества (табл. 15.2) которые не растворяются в воде и связующих материалах, а образуют с ними стойкие суспензии.

Наряду с сухими суспензиями для водных малярных смесей применяют пигментные пасты, которые содержат один или несколько пигментов, мел или известь и небольшое количество клея. Растворимые вещества в малярных смесях почти не используют.

Показатель преломления пигментов находится в границах 1,68-3,1. Пигменты образуют со связующими защитно-декоративные непрозрачные покрытия лишь при значительном различии их пока-

зателей преломления. Так, мел (показатель преломления 1,6) в водных окрашивающих смесях (показатель преломления воды 1,0) имеет хорошую укрывистость и образует непрозрачные покрытия, а в масляных (показатель преломления олиф 1,5) практически не укрывает поверхность, образуя почти прозрачный слой.

Таблица 15.2

Область применения минеральных пигментов

| Пигменты          | Цвет    | Область применения                           |
|-------------------|---------|----------------------------------------------|
| Мел               | Белый   | Грунтовки и шпаклевки, водные малярные смеси |
| Белила цинковые   | Белый   | Масляные и силикатные краски                 |
| Литопон сухой     | Белый   | Масляные краски                              |
| Белила титановые  | Белый   | Масляные краски и эмали                      |
| Перекись марганца | Черный  | Водные и безводные малярные смеси            |
| Сажа              | Черный  | Безводные смеси                              |
| Графит            | Серый   | Водные и безводные малярные смеси            |
| Сурик железный    | Красный | Водные и безводные малярные смеси            |
| Мумия сухая       | Красный | Водные и безводные малярные смеси            |
| Охра сухая        | Желтый  | Водные и безводные малярные смеси            |
| Крон цинковый     | Желтый  | Масляные, эмалевые и клеевые краски          |
| Окись хрома       | Зеленый | Водные и безводные малярные смеси            |
| Ультрамарин       | Синий   | Водные и безводные малярные смеси            |
| Лазурь железная   | Синий   | Водные нещелочные смеси                      |

*Корпусными* называются пигменты, которые имеют хорошую укрывистость. В масляных красках, например, это титановые, цинковые и свинцовые белила, железный сурик. Пигменты, характеризующиеся слабой укрывистостью и дающие в тонком слое полупрозрачные пленки, называют *лессирующими* (голубизна малярная, ультрамарин и др.).

Пигменты классифицируют на минеральные и органические. Минеральные пигменты в свою очередь разделяют на *природные* (мел, каолин, охра, мумия, умбра, сурик и др.) и *искусственные* (белила, кроны, оксид хрома, и др.). Группа органических пигментов наряду с синтетическими красящими веществами органического происхождения содержит вещества, получаемые осаждением анилиновых красителей на белую основу (мел, каолин, тальк). В результате соле- или лакообразования анилиновые красители переводятся в нерастворимые соединения.

Отдельную группу пигментов составляют металлические порошки, которые получают тонким измельчением цветных металлов: бронзы, алюминия, цинка, меди и др.

По цвету пигменты разделяют на *хроматические* и *ахроматические*. Цвета пигментов хроматической группы – красный, оранжевый, желтый, зеленый, синий, фиолетовый. Ахроматические пигменты имеют белый, черный и серый цвета.

Основной цветовой тон, яркость и насыщенность пигментов усиливаются при уменьшении размеров частичек. Для большинства пигментов размер частичек составляет 0,2-0,5 мкм. Дисперсность пигментов определяют микроскопическим, седиментационным и ситовым способами. В последнем случае дисперсность пигментов устанавливают по остатку на ситах с количеством отверстий от 900 до 16900 на 1 см<sup>2</sup>.

Укрывистость пигментов, используемых в строительстве, составляет от 20 до 170 г/см<sup>2</sup>. Укрывистость возрастает при увеличении разности показателей преломления связующего и пигментов и уменьшении размера частичек пигментов до предельного размера, который равняется половине длины световой волны. Ниже этого размера пигменты теряют укрывистость. Смеси пигментов имеют укрывистость, которую можно рассчитать в соответствии с правилом адитивности.

Укрывистость пигментов связана также с их *маслоемкостью* – количеством масла (олифы), которое необходимо добавить к 100 г пигмента, чтобы получить однородную пасту. С уменьшением маслоемкости укрывистость пигментов возрастает. Поскольку масляная пленка подвержена старению, уменьшение маслоемкости положительно влияет также на свойства красок, которые характеризуют их стойкость и долговечность.

Количество пигмента, необходимое для получения красящей смеси заданных цвета и оттенка, зависит от его интенсивности. Пигменты с высокой укрывистостью вместе с тем могут иметь низкую интенсивность. Например, охра едва заметна уже при разбеле 1:15 при укрывистости 65-115 г/м<sup>2</sup>.

Для уменьшения затрат пигментов, увеличения адгезии их к основаниям, прочности и стойкости покрытий, ускорения высыхания пленки в красящие смеси вводят *наполнители*. Обычные наполнители имеют частички размером 5-30 мкм, синтетические – 0,5...5 мкм, показатель преломления их 1,45-1,70. По сравнению с пигментами они имеют худшую укрывистость в неводных соединениях и более слабые красящие свойства. Каолин придает лакокрасочным смесям жирность и легконаносимость, тальк повышает водо- и атмосферостойкость, механическую прочность, адгезию; слюду молотую используют для увеличения химической стойкости и светостойкости, она также необходимый компонент для огнезащитных красок; асбест придает краскам огнестойкость, прочность и является армирующим материалом; барит используют для экономии белил. Введение графита, асбеста, стекловолокон повышает термо- и радиационную стойкость лакокрасочных покрытий. Наполнители пигментов применяют для внутренних слоев покрытия, например в шпаклевках.

*Растворители* применяют для снижения вязкости лакокрасочного материала и доведения его консистенции до необходимой при избранном способе нанесения материала. Введение растворителей замедляет процесс пленкообразования, их излишек может также вызвать снижение прочности и плотности материала, увеличение усадки и ползучести.

В качестве растворителей используют обычно летучие жидкости с температурой кипения 50-200 °С.

Растворители в зависимости от способности их растворять пленкообразующие вещества или лишь разбавлять смесь разделяют на *активные растворители* и *разбавители*. Для различных связующих веществ один и тот же растворитель может быть в одном случае активным растворителем, а в другом – разбавителем.

В качестве разбавителей применяют также олифы, эмульсии, клеевые растворы, которые, в отличие от растворителей, являются одновременно пленкообразующими веществами и используются для разбавления густотертых или разведения сухих неорганических красок.

В лакокрасочные материалы (кроме основных компонентов – связующих, пигментов, наполнителей, растворителей и разбавителей) могут быть введены специальные добавки для регулирования свойств: сиккативы, пластификаторы, гидрофобизаторы, инициаторы, активизаторы, отвердители, тиксотропные добавки и т.п.

*Сиккативы* ускоряют высыхание масляных и эмалевых красок, лаков, олиф. Как сиккативы применяют растворы свинцово-марганцевых солей нафтенowych кислот или смеси нафтенowych кислот с высыхающими или полувсыхающими маслами в бензине или скипидаре.

*Пластификаторы* придают лакокрасочным покрытиям эластичность и повышенную сопротивляемость ударным нагрузкам. К ним принадлежат углеводороды, их галогенопроизводные, простые, сложные и смешанные эфиры, кетоны, спирты, амины и т.п. Наиболее распространенными при получении лакокрасочных материалов являются следующие пластификаторы: невысыхающие растительные масла; разнообразные эфиры двуосновных кислот – фталаты, себацинаты, фосфаты; смолы алкидного типа, хлорированные парафины и дифенилы.

С помощью пластификаторов можно повысить адгезию пленки покрытия к основанию, однако пластификация может уменьшить твердость и излишне повысить пластичность покрытия. Пластификаторы оцениваются испытанием пластифицированных полимеров на прочность, эластичность и, при необходимости, на другие свойства. Пластификатор должен быть бесцветным, без запаха, нетоксичным, стойким к действию ультрафиолетовых лучей.

### 15.3. Основные виды красок и лаков

**Водоразбавляемые краски.** К группе водоразбавляемых относятся краски на основе неорганических вяжущих, животных и синтетических клеев, водных полимерных эмульсий и суспензий.

*Известковые краски* изготовляют на основе гашеной и негашеной извести, их применяют как для внутренней, так и для внешней покраски по кирпичу, штукатурке и бетону. Для повышения стойкости в известковые соединения вводят алюмокалиевые квасцы или поваренную соль. В известковых красках применяют только щелочестойкие пигменты.

Повышению прочности и декоративности известковых пленок способствует введение в известковые смеси порошковидных наполнителей: микроасбеста, мраморной муки, молотого песка и т.п..

*Клеевые краски* изготовляют на животных (в том числе и казеиновых), растительных, карбоксиметилцеллюлозном и др. водоразтворимых клеях. Их применяют для внутренней отделки оштукатуренных поверхностей зданий. Для получения клеевых красок используют различные пигменты.

Клеевые составы на клеях из природного сырья имеют ограниченное применение и заменяются на синтетические красочные составы.

*Силикатные краски* состоят из жидкого калиевого стекла, щелочестойких пигментов и наполнителя (мела). Их применяют для покраски по кирпичу, штукатурке, бетону, камню, асбестоцементу. Они непригодны для покраски по старой штукатурке, гипсу, дереву, а также по пластмассам. Силикатные краски поставляют в двутарной упаковке: сухая пигментная часть и жидкое калиевое стекло в соотношении 1:1 по массе.

Силикатные краски благодаря химическому взаимодействию жидкого стекла с материалом основания образуют на поверхности фасада прочные долговечные пленки.

*Цементные краски* – смеси белого портландцемента с щелочестойкими пигментами и некоторыми добавками (известью, хлоридом кальция), ускоряющими схватывание краски и увеличивающими ее эластичность, адгезию и водоотталкивающие свойства (стеарат кальция). Применяют цементные краски для внешней отделки фа-

## 15. Лакокрасочные и оклеечные материалы

садов зданий, а также для внутренних работ в помещениях с повышенной влажностью.

Тонкость помола цементных красок - остаток на сите № 008 – не более 3 %. Для повышения защитных свойств в краски для подготовительного слоя вводят песок до 20% массы с крупностью зерен 0,15-0,3 мм. Для сильно пористых поверхностей рекомендуются краски с добавкой 1 % карбоксиметилцеллюлозы. Для получения цветных цементных красок применяют железный сурик, оксиды хрома, мунию, литопоновые белила и другие щелочестойкие пигменты.

*Полимерцементные краски* поставляют двухтарными в виде пигментной части и водной дисперсии полимера в соотношении 1:0,3 по массе. Сухая пигментная часть, содержащая белый портландцемент М400, строительную известь, минеральный порошок и пигменты, должна иметь влажность и остаток на сите № 02 – не более 1%.

Полимерцементные краски (табл. 15.3) характеризуются хорошим сцеплением с поверхностью конструкций из разных материалов, повышенной атмосферостойкостью, эластичностью, способностью отвердевать при низкой влажности воздуха.

Таблица 15.3

Составы полимерцементных красок (в мас. ч)

| Составляющее                                                          | Краска           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|
|                                                                       | Перхлорвиниловая | Поливинилацетатная |
| Пигментированная перхлорвиниловая или поливинилацетатная дисперсия    | 1,7-1,8<br>2     | 1-1,2<br>7,2-8,3   |
| Сухая смесь:                                                          | 2                | 4,2                |
| портландцемент белый                                                  | -                | 0,9                |
| гашеная известь                                                       | -                | 1,5-3              |
| известняк молотый или песок                                           | -                | 0,2                |
| микроасбест                                                           | -                | 0,05               |
| стеарат кальция                                                       |                  |                    |
| Растворитель (4 массовые части сольвента и 1 массовая часть керосина) | 0,3-0,4          | -                  |



Кроме полимерцементных красок для отделочных работ применяют *гипсополимерцементные* и *известково-полимерные* составы.

*Водоэмульсионные* и *вододисперсионные краски* являются эмульсиями или суспензиями пигментов и наполнителей в пленкообразующих водных дисперсиях полимеров с добавками эмульгаторов, стабилизаторов и других веществ. В зависимости от вида полимера водоэмульсионные краски бывают поливинилацетатные, каучуковые, полиакриловые и др. Их используют для внутренних и внешних работ. Краски для внутренних работ не рекомендуется применять в помещениях с повышенной влажностью.

Наиболее широко используют краски на основе латексов гомо- и сополимеров винилацетата, сополимеров стирола с бутадионом, сополимеров акрилатов.

Количество пленкообразующего вещества в красках этого типа 40-55%. Полиакрилатными эмульсионными красками окрашивают в основном фасады зданий, внешние деревянные поверхности, стирол-поливинилацетатными и бутадиеновыми - преимущественно интерьеры.

Водо-дисперсионные составы практически не имеют запаха. Образующееся покрытие имеет высокую адгезию практически ко всем основаниям и обладает высокими эксплуатационными характеристиками. Ими можно окрашивать влажные поверхности, они негорючи, пропускают пары воды, повышая комфортабельность жилых помещений. Физические свойства вододисперсионных лакокрасочных материалов зависят от вида полимера, использованного в качестве связующего. Так, краски на основе ПВА обладают низкой водостойкостью. Их применяют преимущественно для окраски потолков и внутренних стен в сухих помещениях. Бутадиенстирольные дисперсии обладают хорошей водостойкостью, но имеют ограниченную светостойкость (желтеют под воздействием света). Наиболее универсальны *акриловые краски*, составляющие наиболее значительную часть вододисперсионных красок. Они хорошо колеруются с получением множества различных цветов и оттенков, сохраняют цвет и выдерживают интенсивное ультрафиолетовое облучение. Акриловые краски позволяют создавать эластичные покрытия, способные перекрывать “волосяные” трещины в основании до 0,5 мм, долговечны и стойки к мытью.

Вододисперсионные *кремнийорганические (силиконовые) краски* придают покрытиям гидрофобные свойства, что существенно увеличивает их долговечность. Краски на основе силиконовых смол объединяют лучшие свойства акриловых и силикатных красок.

**Масляные краски.** *Масляные краски* – это суспензии неорганических пигментов и наполнителей в олифах. Олифы бывают натуральные, полунатуральные, комбинированные и искусственные. *Натуральные олифы* получают из растительных (льняного, конопляного и др.) масел при их нагревании. Пленки натуральных олиф обладают высокой прочностью, эластичностью и стойкостью против атмосферных воздействий. *Полунатуральные олифы* (олифа-оксоль) состоят из уплотненных растительных масел, разбавленных растворителями. Пленки из полунатуральных олиф отличаются меньшей толщиной, большей твердостью, водостойкостью и менее сильным глянцем. По долговечности пленки полунатуральных олиф значительно ниже, чем натуральных, т.к. они быстро теряют эластичность, вследствие испарения растворителей. *Комбинированные олифы*, используемые в основном для получения густотертых красок, являются продуктами полимеризации и обезвоживания высыхающих или полувсыхающих масел. *Искусственные или синтетические олифы* не содержат растительных масел или содержат их в незначительном количестве. Они являются по существу синтетическими полимерными связующими. Искусственные олифы применяют для неотчетственных покрытий.

В состав масляных красок вводят в качестве добавок сиккативы – ускорители высыхания, а также поверхностно-активные вещества, облегчающие диспергирование пигментов и наполнителей. Промышленность выпускает густотертые (пастообразные) и готовые к употреблению (жидкие) масляные краски. Густотертые краски разбавляют до рабочей вязкости олифами. К масляным краскам по свойствам приближаются *алкидные краски*, изготавливаемые на алкидных (глифталевых и пентафталевых) олифах.

Масляные краски выпускают как для внутренних так и для внешних работ.

**Эмалевые краски.** Эмалевые краски являются суспензиями пигментов в полимерных связующих. Высыхая, эмали образуют твердый слой покрытия с интенсивным блеском. Виды эмалей обусловлены видами полимерных связующих.

Высыхание пленки в эмалевых красках происходит вследствие испарения летучего растворителя и твердения полимерного связующего в тонком слое покрытия. Эмалевые краски выпускают обычно готовыми к использованию. Они могут включать в себя пластификаторы, отвердители, ускорители высыхания, стабилизаторы, антисептики, поверхностно-активные вещества и другие добавки. Эмалевые краски применяют для внешней и внутренней отделки по металлу, бетону, древесине, штукатурке. Для них характерны светостойкость, химическая стойкость, стойкость к атмосферному влиянию.

Эмали наносят на загрунтованную поверхность. Они защищают поверхности конструкций от действия внешней среды, придают им декоративный вид и некоторые специальные свойства.

*Перхлорвиниловые эмали* стойки к действию большинства минеральных кислот и щелочей разной концентрации при температуре до 60°C, нестойки к окислителям, высококонцентрированным серной и азотной кислотам, ароматическим углеводородам. Они быстро высыхают, образуют прочную пленку.

Эмали рекомендуется наносить при температуре не ниже 8°C. Покрытия на основе перхлорвиниловых эмалей разлагаются при нагревании выше 60-80°C с выделением хлорида водорода.

*Эпоксидные эмали* характеризуются высокой адгезией к металлам и неметаллам, твердостью и стойкостью к агрессивным средам. Эпоксидные эмали обычно двухкомпонентные, в них входят суспензия пигментов в растворе эпоксидной смолы и отвердитель. В качестве связующего для получения эмалей распространена эпоксидная смола Э-41. Используют также смолы ЭД-16, ЭД-20, Э-30. Отвердителями служат гексаметилендиамин, диэтилентриамин, полиэтиленполиамин.

Эпоксидные лакокрасочные материалы бывают холодного и горячего отверждения. При окрашивании материалами холодного отверждения температура воздуха должна быть не ниже 15 °C.

*Глифталевые эмали* являются суспензиями пигментов и наполнителей в глифталевом лаке с добавлением сиккатива и растворителя. Разбавляют эмали до требуемой вязкости уайт-спиритом, скипидаром, ксилолом, сольвентом или их смесью.

Для противокоррозионной защиты можно применять эмали, состоящие из глифталевого лака и алюминиевой пудры (6-12 %), их термостойкость – до 300 °C.

Глифталевые эмали не рекомендуется использовать на поверхностях, на которые действуют прямая солнечная радиация, атмосферные осадки и биологические факторы.

*Пентафталевые эмали* изготовляют на основе фталевого ангидрида и пентаэритрита в смеси с пигментами, наполнителями и растворителями. Они образуют покрытия более атмосферостойкие, эластичные, более водостойкие и стойкие к температурным колебаниям, а также механическим воздействиям, чем глифталевые.

Вводя в пентафталевый лак алюминиевую пудру, получают термостойкие (до 300 °С) покрытия.

Эмали перед использованием разбавляют до рабочей вязкости сольвентом, ксилолом, уайт-спиритом.

*Кремнийорганические эмали* отличаются стойкостью к действию высоких и низких температур и их циклическому изменению, высокими электроизоляционными свойствами, масло-, бензо- и морозостойкостью. Предназначены для защиты от атмосферной коррозии поверхности металлических и других изделий и конструкций, которые эксплуатируются при температуре от - 60 до 300°С.

*Нитроцеллюлозные эмали* – суспензии пигментов с добавками пластификатора и диспергатора в растворе нитроцеллюлозы и других смол в смеси летучих органических растворителей. Разбавляют до рабочей вязкости уайт-спиритом, скипидаром или их смесью. Дают однородную гладкую полуглянцевую или полуматовую пленку, быстро высыхают.

Нитроцеллюлозные эмали применяют преимущественно для покрытий по деревянным и металлическим поверхностям.

*Порошковые краски* представлены мелкодисперсными порошками, включающими синтетические смолы, отвердители, пигменты и другие добавки, полимеризующиеся при нагревании до 140-200°С и образующие равномерное покрытие. Они характеризуются высокой прочностью и адгезией к покрываемым поверхностям. Благодаря отсутствию растворителей порошковые краски обладают меньшей усадкой и пористостью. Способ нанесения краски позволяет создавать идеально ровные и гладкие поверхности, характеризующиеся высокой стойкостью к различным видам воздействий, хорошими антикоррозионными свойствами.

Порошковые краски классифицируют: по типу смол – эпоксидные, эпоксидно-полиэфирные, полиэфирные, полиакриловые, полиуретано-

вые; по типу образуемых поверхностей – гладкие, шагрень и др.; по степени блеска поверхностей – глянцевые, полуглянцевые, полуматовые, матовые.

Окрашивание порошковыми красками не требует грунтования поверхностей. Перед нанесением порошковой краски производится подготовка поверхности методами обезжиривания и фосфатирования. Краски наносят в основном на металлические и стеклянные поверхности методом напыления.

**Лаки.** Лаки подразделяют в зависимости от вида пленкообразующего вещества на масляные, масляно-смоляные, алкидные, эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые, кремнийорганические, нитроцеллюлозные, битумные и др. Лаки могут быть получены с использованием воды или органического растворителя. Лаки классифицируют также в зависимости от вида материала обрабатываемой поверхности: для древесины, металлов и др. По способности к блеску лаки разделяют на высокоглянцевые (степень блеска 100%), глянцевые (80-90%), полуглянцевые (40-50%), полуматовые (10-15%) и матовые (не имеющие блеска).

По цвету пленки лаки бывают прозрачными, темными и цветными. Цвет и прозрачность лаковой пленки важны для сохранности текстуры обрабатываемого материала. Для улучшения качества лаковой пленки могут вводиться пластификаторы.

В строительстве наиболее распространены масляно-смоляные, синтетические безмасляные, битумные и асфальтовые лаки.

*Масляные лаки* – растворы в органических растворителях продуктов взаимодействия растительных масел с природными или синтетическими смолами. Эти лаки образуют прозрачные пленки желтоватого цвета, имеют пониженную атмосферостойкость.

*Масляно-смоляные лаки* – растворы природных или алкидных (глифталевых, пентаглифталевых) смол в органических растворителях, модифицированные растительными маслами. Их используют в основном для внутренних работ при отделке древесины.

*Алкидные лаки* – растворы в органических растворителях синтетических алкидных смол или их композиций с карбамидоформальдегидной смолой. Пленки на основе этих лаков отличаются повышенной твердостью, водостойкостью, износостойкостью. Применяются при выполнении внутренних и наружных работ, покрытия паркетных полов.

*Перхлорвиниловые, полиэфирные, эпоксидные, силиконовые лаки* – растворы соответствующих смол. Перхлорвиниловые лаки применяют для лакирования масляных покрытий. Полиэфирные лаки отличаются безупадочностью, поскольку растворитель (как правило, стирол) не выделяется во время твердения, а полимеризуется с растворенной смолой. *Эпоксидные лаки* отверждаются при использовании добавок-отвердителей, образуют высокопрочные, водо- и щелочестойкие пленки, имеющие высокую адгезию к различным поверхностям, но недостаточно атмосферостойкие. Силиконовые (кремнийорганические) лаки способны выдерживать кратковременное влияние высоких температур (до 500°C).

*Нитроцеллюлозные лаки* (нитролаки) получают при растворении нитрата целлюлозы в смеси активных растворителей. В растворы добавляют различные смолы (алкидные, аминоформальдегидные и др.). Нитролаки быстро высыхают и их свойства могут изменяться в широком диапазоне. Чаще их используют для отделки деревянных и металлических поверхностей.

*Битумные и асфальтовые лаки* – растворы нефтяных битумов или асфальтов, а также их смесей с растительными маслами в органических растворителях. Эти лаки имеют черный цвет, характеризуются высокой химической стойкостью и атмосферостойкостью. Применяют для антикоррозионных покрытий металлических поверхностей. С этой целью применяют также каменноугольные лаки – растворы каменноугольного пека в органических растворителях.

*Политуры* являются растворами смол (в основном шеллака) в этиловом спирте. Ими полируют изделия из дерева, они дают возможность получить твердые покрытия с зеркальным блеском, обнаруживающие текстуру древесины.

### 15.4. Оклеечные материалы

В группу оклеечных материалов, применяемых для декоративной отделки помещений, входят обои и декоративные пленки. *Обои* – рулонные отделочные материалы на основе, с печатным или тисненым рисунком различных тонов на одно- или многоцветном фоне. Декоративное покрытие обоев может иметь определенный рисунок, а также имитировать текстуру дерева, фактуру тканей, поверхность металла и другие материалы.

Обои изготавливают следующих классов: бумажные, виниловые и текстильные на бумажной основе и на основе из нетканых композиционных материалов (флизелиновые).

*Бумажные обои* подразделяются на два вида: симплекс-обои (обои, имеющие один слой бумаги) и дуплекс-обои (обои, состоящие из двух склеенных слоев бумаги).

*Виниловые обои* представляют собой бумажную основу с виниловым покрытием различной плотности, придающим обоям прочность и влагостойкость. Применяются виниловые обои, как правило, в помещениях с повышенными гигиеническими требованиями. Среди виниловых обоев выделяют отдельные категории, различающиеся способом изготовления, плотностью, внешним видом (вспененный винил, плотный ("кухонный") винил и др.).

*Акриловые обои* являются аналогом виниловых вспененных обоев, но на основу наносится не виниловая, а акриловая эмульсия.

*Текстильные обои* представляют собой бумажное полотно, ламинированное нитями из натуральных или смешанных волокон. Они обладают повышенными теплоизоляционными и звукопоглощающими свойствами, светостойкостью. Текстильные обои относятся к группе трудносгораемых материалов, а материалы, содержащие льняные волокна обладают бактерицидными свойствами. Выпускаются также текстильные обои на синтетической основе, которые представляют собой текстильное полотно, наклеенное на поролон.

*Велюровые обои* представляют собой бумажное полотно, на которое в процессе производства сначала наносится рисунок, а затем велюровые ворсинки. В результате образуется мягкая бархатная поверхность. Текстильные и велюровые обои предназначены для оклейки стен и потолков офисных, жилых и административных зданий.

Бумажные и виниловые обои изготавливают гладкими и рельефными, тисненными, профильными и металлизированными. Последние ламинированы металлическим слоем на основе фольги или металлизированной пленки.

В зависимости от устойчивости верхней стороны к истиранию при наклеивании и эксплуатации обои изготавливают следующих марок:

- В-0 – водостойкие при наклеивании;
- В-1 – водостойкие при эксплуатации;
- М-1 – устойчивые к мытью (моющиеся);
- М-2 – с высокой устойчивостью к мытью;

## 15. Лакокрасочные и оклеечные материалы

---

- М-3 – устойчивые к трению;
- С – устойчивые к сухому истиранию.

В последние годы на рынке появился ряд новых видов обоев. Особым видом обоев являются *обои под покраску*. Они выпускаются на бумажной и флизелиновой основах, обычно в рулонах большой длины и пропитываются специальным водоотталкивающим составом. Обои этого типа позволяют снижать требования к качеству подготовки стены, обладают способностью к паропропусканию. Их можно до 5-15 раз перекрашивать дисперсионными красками. *Структурные обои* изготавливают из двух слоев фактурной бумаги белого цвета, склеенных между собой. Изготавливают также трехслойные тисненные обои с дополнительным слоем бумаги, придающим большую жесткость полотнищу и способствующим лучшему взаимодействию с клеем, наносимым на стену. *Грубоволокнистые обои* состоят из двух слоев плотной бумаги с запрессованными между ними древесными волокнами (опилками). Наличие опилок обеспечивает зернистую фактуру покрытия. Обои выдерживают до 15 циклов перекрашивания. *Стекловолоконистые обои* имеют основу из стеклоткани, что придает им высокую степень огнестойкости, прочность и эластичность.

Разновидностью бумажных обоев является *линкруст* – рулонный материал с рельефным рисунком, состоящий из смеси синтетических полимеров и наполнителей, наносимых на бумажную основу. Линкруст предназначен для внутренней отделки стен в помещениях с нормальным температурно-влажностным режимом эксплуатации. Для линкруста нормируются поверхностное водонасыщение (не более  $1\text{ г}/100\text{ см}^2$ ) и разрывное усилие (не менее  $9,8\text{ Н/см}$ ).

*Поливинилхлоридная декоративная отделочная пленка* – рулонный отделочный материал, изготавливаемый вальцово-каландровым способом из поливинилхлорида, пластификаторов, пигментов и различных добавок. Выпускают пленки типа ПДСО с клеевым слоем на оборотной стороне, защищенным антиадгезионной бумагой, и типа ПДО – без клеевого слоя.

Длина рулона пленки ПДО – 150 м, ширина – 1500-1600 мм, толщина – 0,15 мм; длина пленки ПДСО – 15-800 м, ширина – 450-900 мм, толщина – 0,15 мм.

Поверхность пленки может быть гладкой или тисненной, многоцветной с печатным рисунком.

Допустимое разрушающее напряжение на растягивание в продольном направлении – не менее 9,8 МПа, изменение линейных размеров в



продольном направлении – не более 7%, в поперечном – не более 1,5%. Пленку можно мыть водой комнатной температуры.

Пленки типа ПДО и ПДСО предназначены для внутренней отделки поверхностей стен помещений жилых и общественных зданий, дверей, встроенной мебели.

*Винистен* – безосновный поливинилхлоридный рулонный материал с рельефной поверхностью, предназначенный для отделки стен в помещениях общественных зданий для кратковременного пребывания людей.

К пленкам на бумажной основе принадлежат изоплен, пеноплен и полиплен.

*Изоплен* – рулонный материал, изготавливаемый промазыванием смесью из поливинилхлорида, пластификаторов, наполнителей, пигментов и различных добавок бумажной подосновы. Его сматывают в рулоны 10, 12, 18 м длиной, 500, 600 и 750 мм шириной; 0,3 мм толщиной.

Изоплен выпускают трех типов: А – одноцветный; Б – многоцветный с печатным рисунком, покрытым прозрачным поливинилхлоридным слоем; В – многоцветный с печатным рисунком на лицевой стороне пленки.

*Пеноплен* – рулонный материал, изготавливаемый из поливинилхлорида, стабилизатора, пластификатора, пенообразователя и пигментов, нанесенных на бумажную подоснову.

Пенопленом обклеивают коридоры и кухни жилых помещений, туалеты, кабинеты, гостиничные номера, вспомогательные помещения в производственных сооружениях. Нельзя обклеивать пенопленом лестничные клетки, фойе, вестибюли, помещения с массовым пребыванием людей, детские учреждения, больницы.

*Полиплен* – рулонный материал, изготавливаемый из поливинилхлоридного печатного слоя с пластификаторами, стабилизаторами, пигментами и наполнителями, нанесенными на бумажную подоснову.

Применяют полиплен для отделки таких же помещений, что и пеноплен.

1. Алимов Л.А., Воронин В.В. Строительные материалы. – М.: Академия, 2012. – 320 с.
2. Арзамасов В.Б., Волчков А.Н., Головин В.А. Материаловедение и технология конструкционных материалов. – М.: Academia, 2009. – 448 с.
3. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: АСВ, 2007. – 528 с.
4. Большаков В.И., Дворкин Л.И. Строительное материаловедение. – Днепропетровск: Днепр-VAL, 2004. – 677 с.
5. Волокитин Т.Т., Гузеев В.В. Физико-химические основы строительного материаловедения. – М.: АСВ, 2004. – 192 с.
6. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы. – М.: Стройиздат, 1986. – 688 с.
7. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Справочник по строительному материаловедению. – М.: Ифра-Инженерия, 2010. – 472 с.
8. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные минеральные вяжущие материалы. – М.: Инфра-Инженерия, 2011. – 544 с.
9. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Специальные бетоны. – М.: Инфра-Инженерия, 2012. – 368 с.
10. Dvorkin L., Nwaubani S, Dvorkin O. Construction Materials . – New York: Nova Science Publishers, Inc – 409 p.
11. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical experiments Planning in Concrete Technology. – New York: Nova Science Publishers, Inc – 173p.
12. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. – С-Пб.: Стройбетон, 2006. – 689 с.
13. Дворкин Л.И. и др. Практическое бетоноведение в вопросах и ответах. Справочное пособие. – С-Пб.: Стройбетон, 2008. – 328 с.
14. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Современные отделочные и облицовочные материалы. Практический справочник. – М.: РИПОЛ Классик, 2010. – 576 с.
15. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности. Учебно-справочное пособие. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 368 с.

16. Кривенко П.В., Пушкарева Е.К. и др. Строительное материаловедение. К.: Основа, 2007. – 704 с.
17. Микульский В.Г., Сахаров Г.П. и др. Строительные материалы (Материаловедение. Технология конструкционных материалов). – М.: АСВ, 2007. – 520 с.
18. Наназашвили И.Х. Наназашвили В.И., Бунькин И.Ф. Строительные материалы и изделия. Справочное пособие. – М.: Аделант, 2008. – 480 с.
19. Основин В.Н., Шуляков Л.В., Дубяго Д.С. Справочник по строительным материалам и изделиям. – Ростов н/Д.: Феникс, 2008. – 443 с.
20. Погодина Т.М. Современные материалы для общестроительных и отделочных работ. Справочное пособие. – С-Пб.: Профи-информ, 2005. – 512 с.
21. Попов К.Н., Куддо М.Б. Строительные материалы и изделия. – М.: "Высшая школа", 2005. – 438 с.
22. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение. – М.: Высшая школа, 2008. – 701 с.
23. Строительные материалы (под ред. Г.В. Несветаева). – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 621 с.

---

**ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ**

---

**Автоклавная обработка** 173

Аглопорит 261

Адгезия 80

Адсорбция 47

Асбестоцемент 562

Алит 410

Ангидрит 183

Ангоб 248

Андезит 190

Анизотропия 34

Антиоксиданты 743

Антипирены 627

Антисептики 627

Арболит 660

Арматура 545

- *гибкая* 546

- *жесткая* 547

- *рабочая* 547

Армирование 552

- *линейное* 552

- *непрерывное* 552

Асфальтены 669

Атмосферостойкость 796

Аустенит 323

**Базальт** 191

Белит 410

Бетоны 457

- *асфальтовые* 691

- *высокопрочные* 521

- *гидротехнические* 525

- *декоративные* 531

- *дорожные* 527

- *жаростойкие* 530

- *крупнопористые* 538

- *литые* 520

- *легкие* 533

- *мелкозернистые* 518

- *песчаные* 518

- *полимерцементные* 524

- *поризованные* 539

- *самоуплотняющиеся* 521

- *силикатные* 572

- *специального назначения* 525

- *теплоизоляционные* 533, 540

- *тяжелые* 518

- *шлаковые* 577

- *электропроводные* 532

- *электротехнические* 531

- *ячеистые* 539

Бетонополимеры 523, 524

Биокоррозия 112

Биоповреждения 516

Битумы 676, 673

- *крекинговый* 671

- *нефтяной* 670

- *окисленный* 670

- *остаточный* 670

- *природный* 672

Блеск 104, 178, 796

Блоки пустотелые 297

Бревна 630

Бруски 630

Бруссы 630

**Вагонка** 632

Вата минеральная 304

Вектор Бюргерса 41

Винистен 813

Влажность 92

- *абсолютная* 92

- *относительная* 92

Вода затворения 462

Водопоглощение 91

Водопроницаемость 92

Водостойкость 94

Вяжущие 364

- *автоклавногo твердения* 364

- *ангидритовые* 376
- *битумные* 668
- *воздушные* 364
- *гидравлические* 364
- *гипсовые* 364
- *гипсоцементнопуццолановые* 375
- *гипсоцементношлаковые* 375
- *дегтевые* 680
- *известсодержащие* 385
- *известково-золевые* 386
- *известково-шлаковые* 401
- *композиционные* 682
- *магнезиальные* 392
- *шлакощелочные* 402
- Выветривание 215
  - *физическое* 215
  - *химическое* 216

**Габбро** 189

Газобетон 539

Газопроницаемость 92

Газосиликат 539

Гель 50

Гемицеллюлоза 613

Гипс 183, 367

Гипсобетон 582

Глазурь 248

Глины 218

Гнейс 198

Гниль 616

Горные породы 175

Гранит 188

**Дегтебетоны** 704

Детали профильные 632

Дефекты материалов 38

- *линейные* 40

- *точечные* 38

Деформации 499

Диабаз 191

Диатомит 197

Дислокации 40

- *винтовая* 40

- *краевая* 40

Добавки 414

- *активные минеральные* 468

- *воздухововлекающие* 506

- *модификаторы* 414

- *пластификаторы* 465, 802

- *противоморозные* 467

- *суперпластификаторы* 425, 465

- *ускорители твердения* 666

Дозаторы 155

Дозирование 155

Доломит 183, 195

Доски 630

Древесина 612

- *клееная* 638

- *спелая* 614

**Жаростойкость** 102, 509

Железо 322

Железобетон 544

Жизнеспособность 588

Жерды 630

**Заболонь** 614

Заготовки из древесины 632

Закаливаемость 346

Заполнитель 457

Защита протекторная от коррозии 362

Звукопоглощение 105

Зола 386

Золь 50

**Известняки** 195

- *оолитовые* 196

Известковое тесто 377

- Известь 377
- *воздушная* 380
  - *гидратная* 377
  - *комовая* 377
  - *молотая негашеная* 377
  - *гидравлическая* 383
- Изоморфизм 39
- Измельчение 148
- Измерения
- *косвенные* 22
  - *прямые* 22
  - *совместные* 22
  - *совокупные* 23
- Изоплен 813
- Износостойкость 84, 529
- Изоморфизм 178
- Иониты 48
- Ирризация 190
- Искусственные конгломераты 20
- Истираемость 83
- Кальцит** 183
- Камень
- *бутовый* 211
  - *гипсовый* 365
- Камбий 614
- Карбены 669
- Карьер 212
- Кварц 181
- Кварцит 199
- Керамзит 260
- Керамика 239
- *грубая* 239
  - *плотная* 239
  - *пористая* 239
  - *тонкая* 239
- Кинетика химическая 114
- Кирпич 243
- *двухслойный* 248
  - *керамический* 243
  - *пустотелый* 243
- Кислотостойкость 796
- Класс бетона 21, 481
- Кластеры 45
- Клетчатка 612
- Когезия 80
- Конструкции 545
- *монолитные* 545
  - *сборно-монолитные* 545
  - *сборные* 545
- Контракция 429
- Конформация 723
- Кора 613
- Коробления 71
- Коррозия 111, 360
- *I-го вида* 514
  - *II-го вида* 514
  - *III-го вида* 514
  - *кислотная* 514
  - *магнезиальная* 514
  - *органогенная* 516
  - *солевая* 515
  - *сульфатная* 515
  - *углекислая* 514
  - *химическая* 360
  - *электрохимическая* 360
- Коэффициент
- *линейного расширения* 101
  - *Пуассона* 67, 275
  - *размягчения* 585
  - *сдвига* 703
  - *фильтрации* 92
- Краски 793, 803
- *алкидные* 806
  - *водоразбавляемые* 805
  - *водоэмульсионные* 805
  - *известковые* 803
  - *клеевые* 803
  - *комбинированные* 806
  - *масляные* 806
  - *натуральные* 806

- полимерцементные 804
- силикатные 803
- полунатуральные 806
- порошковые 807
- цементные 803
- эмалевые 807

Кратность пены 55

Кристаллиты 144, 267,316

Кристобалит 122

Кряжи 630

Ксилолит 394

**Лабрадорит** 190

Лаки 793, 809

- алкидные 809
- асфальтовые 810
- битумные 810
- масляные 809
- масляно-смоляные 809
- нитроцеллюлозные 810
- эпоксидные 810

Ламинат 637

Ледебурит 323

Лигнин 612

Линолеум 761

- алкидный 761
- резиновый многослойный 762

Линкруст 812

Листы 579

- гипсоволокнистые 581
- гипсокартонные 579

Луб 613

**Магнезит** 183, 195

Майолика 240

Макрокапилляры 58

Масла 669

Марка цемента 432, 435

Марка бетона 21

Мастики 689

- горячие 689

- холодные 689

Микрокремнезем 468

Материалы 16

- акустические 16
- асфальтовые 687
- гидроизоляционные 16
- для несущих конструкций 16
- для ограждающих конструкций 16
- композиционные 17
- кристаллические 29
- лакокрасочные 793
- металлические 315
- отделочные 16
- полимерные 715
- рулонные 706
- специального назначения 17
- стеклокристаллические 309
- теплоизоляционные 16

Методы определения качества 21

- инструментальный 21
- органолептический 21
- расчетный 21
- социологический 21
- экспертный 21

Методы очистки газов 153

- механические 153
- мокрые 153
- фильтрация 153
- электрические 153

Метрология 22

Микрокапилляры 58

Мипора 774

Мицелла 51, 140

Модифицирования 320

Модели 124

- математические 126
- структурные 124
- субстанциональные 124
- функциональные 125

Модуль упругости 67, 529, 576

Мономер 717

Морозостойкость 95, 503

Мрамор 199

Минералы 176

Муллит 122, 227

**Наполнители** 57, 801

Натяжение арматуры 552

- *механическое* 552

- *химическое* 552

- *электротермическое* 552

- *электротермомеханическое* 552

Нефелометрия 46

**Обжиг** 167

Обои 810

- *акриловые* 811

- *бумажные* 811

- *виниловые* 811

- *велюровые* 811

- *под покраску* 812

- *текстильные* 811

Обработка металлов 337

- *волочение* 337

- *ковка* 337

- *прессование* 337

- *прокатка* 337

- *термомеханическая* 348

- *химико-термическая* 349

- *штамповка* 337

Огнестойкость 509

Огнеупорность 102

Огнеупоры 261

- *динасовые* 262

- *кварцевые* 262

- *полукислые* 262

- *шамотные* 262

Олигомеры 715

Опилки 651

Опилкобетоны 666

Опока 197

Ортоклаз 181

Отжиг 272

**Парафин** 669

Паркет 634

Пена 55

Пенобетон 539

Пеноплен 813

Пеносиликат 539

Пеностекло 299

Пептизация 50

Пергамин 708

Периклаз 392

Перлит 323

Петрография 176

Пигменты 531, 798

- *ахроматические* 800

- *искусственные* 800

- *корпусные* 800

- *лессирующие* 800

- *природные* 800

- *хроматические* 800

Плагиоклазы 181

Планирование эксперимента 127

Пластики древесные 644

Пластмассы 747

- *жесткие* 747

- *конструкционные* 754

- *мягкие* 747

- *полужесткие* 747

- *эластичные* 747

Пластичность 69

Плесень 618

Пленки

- *армированные* 767

- *полипропиленовые* 768

- *полиэтиленовые* 768

Плитки 251

- *для облицовки стен* 253

- *для полов* 254



- *клинкерные* 251
- *литые* 254
- *майоликовые* 251
- *стеклянные* 295
- *терракотовые* 251
- Плиты древесные 654
- Плотность
  - *истинная* 85
  - *насыпная* 85
  - *относительная* 86
  - *средняя* 85
- Поверхностное натяжение 88
- Поверхностная энергия 88
- Поверхностно-активные вещества 47
- Показатели 24
  - *надежности* 24
  - *назначения* 24
  - *технико-экономичные* 24
  - *технологичности* 24
- Полипропилен 729
- Полиэтилен 727
- Ползучесть 70
- Полиакрилат 732
- Поливинилацетат 732
- Поливинилхлорид 731
- Ползучесть 70, 499
- Полиизобутилен 730
- Поликарбонат 758
- Полимеры 715
  - *алкидные* 737
  - *инден-кумароновые* 733
  - *карбамидоформальдегидные* 734
  - *кремнийорганические* 738
  - *меламиноформальдегидные* 734
  - *новолачные* 735
  - *резольные* 735
  - *фенолоальдегидные* 735
  - *эпоксидные* 737
- Полиморфизм 320
- Полиплен 813
- Полистирол 731
- Политуры 810
- Полиуретаны 733, 736
- Полы гелевые 57
- Поляризация 107
- Пористость 59, 86
- Породообразующие минералы 181
- Породы горные 184
  - *глубинные* 184
  - *изверженные* 184
  - *излившиеся* 184
  - *метаморфические* 186
  - *органогенные* 197
  - *осадочные* 185
  - *химические* 195
- Портландцементы 404, 433
  - *высокопрочные* 435
  - *гидрофобные* 437
  - *декоративные* 450
  - *клинкерные* 452
  - *композиционные* 442
  - *низкотермичные* 446
  - *общестроительного назначения* 433
  - *пластифицированные* 437
  - *пуццолановые* 441
  - *сверхбыстротвердеющие* 437
  - *с минеральными добавками* 435
  - *специального назначения* 444
  - *сульфатостойкие* 444
  - *тампонажные* 446
  - *умереннотермичные* 446
  - *цветные* 451
  - *шлакопортландцемент* 435
- Порфир 190
- Поры 421
  - *капиллярные* 421
  - *контракционные* 421
  - *мезопоры* 421
  - *макропоры* 421
  - *микровоздушные* 421
  - *микропоры* 421
  - *недоуплотнения* 421

Предел прочности 76

Прозрачность 104, 178

Пропаривание 170

Протравливание 628

Процессы 141

- гидратации 140

- кристаллизации 142

- поликонденсации 142

- полимеризации 141

Прочность 76, 482

- ударная 84

Пуццоланы 192

Радиус атомный (ионный) 33

Размокаемость глин 222

Радиоактивность 110

Расплавы силикатные 265

Растворы 139

- истинные 139

- коллоидные 139

Растворители 801

Растворы кладочные 320, 592

- биоцидные 604

- гидроизоляционные 602

- звукопоглощающие 604

- инъекционные 602

- кислотостойкие 603

- отделочные 595

- декоративные 597

- для штукатурок 596

- камнеподобные 598

- полимерцементные 600

- специальные 601

- тампонажные 603

Реактопласты 717

Релаксация 67

Реология 72

Риплит 660

Романцемент 384

Рубероид 708

Свариваемость 341, 547

Светостойкость 796

Свойства материалов

- акустические 105

- гидрофизические 88

- деформативные 65

- прочностные 75

- реологические 72

- теплофизические 96

- оптические 103

- электрофизические 106

- радиационно-физические 108

- химические 111

Сдвигоустойчивость 696

Сиенит 189

Сиккативы 801

Сигран 309

Силикаты 176

Ситаллы 310

Слюда 182

Смеси сухие 604

Смесь бетонная 471

Смолы 669

Сопротивление

- акустическое 105

- электрическое 106

состав

- вещественный 14

- минералогический 14

- фазовый 14

- химический 14

Сотопласты 774

Спайность 179

Спекаемость 226

Спекание 146

Сплавы цветных металлов 355

- алюминиево-магниевые 356

- алюминиево-марганцевые 356

- высокопрочные 358

- жаропрочные 358

- *ковочные* 358
- *магниевого* 359
- Способы уплотнения 476
  - *вибровакuumирование* 477
  - *вибропресование* 477
  - *вибропрокат* 477
  - *виброштампование* 477
- Способы изготовления изделий 555
  - *кассетный* 557
  - *конвейерный* 556
  - *поточно-агрегатный* 555
  - *стендовый* 557
- Способы получения полимеров 724
  - *поликонденсация* 726
  - *полимеризация* 724
- Способы производства стали 328
  - *кислородно-конвертерный* 328
  - *конвертерный* 328
  - *мартеновский* 328
  - *электроплавильный* 329
- Стабилизаторы 743
- Стали 326
  - *высоколегированная* 334
  - *доэвтектоидная* 325
  - *заэвтектоидная* 325
  - *качественная* 331
  - *кипящая* 331
  - *листовая* 338
  - *мягкая* 548
  - *низколегированная* 334
  - *полуспокойная* 331
  - *сортная* 338
  - *спокойная* 331
  - *среднелегированная* 334
  - *строительная* 338
  - *углеродистая* 331
  - *эвтектоидная* 325
- Стекло 145, 265
  - *авантюриновое* 309
  - *армированное* 289
  - *жидкое* 387
  - *закаленное* 292
  - *клинкерное* 412
  - *листовое* 287
  - *многослойное* 293
  - *растворимое* 387
  - *строительное* 265
  - *теплопоглощающее* 290
  - *термически полированное* 292
  - *увиолевое* 292
  - *узорчатое* 290
- Стеклокремнезист 309
- Стеклопакеты 295
  - *стевит* 297
- Стеклопрофилит 297
- Стемалит 293
- Структура бетона
  - *коагуляционная* 419
  - *контактная* 61, 478
  - *поровая* 61, 478
- Структура горных пород 187
  - *кристаллическая* 187
  - *обломочная* 187
  - *оолитовая* 187
  - *порфировая* 187
  - *стекловатая* 187
- Структуры кристаллов 34
  - *каркасные* 34
  - *координационные* 34
  - *островные* 34
  - *слоистые* 34
  - *цепочечные* 34
- Суспензии 54
- Сучковатость 616
- Сушка 164
- Т**  
**Твердение извести** 381
  - *гидратное* 382
  - *гидросиликатное* 382
  - *карбонатное* 381
- Твердость** 179

Тиксотропия 51, 426, 471  
Текстура древесины 628  
Текучесть 70  
Температура 675  
- *вспышки* 675  
- *размягчения* 675  
- *стеклования* 721  
- *текучести* 721  
- *хрупкости* 721  
Тепловыделение 508  
Теплоемкость 96  
Теплопроводность 97  
Термодинамический метод 114  
Термопласты 716  
Термостойкость 101, 509  
Терракота 240  
Токсичность 113  
Трассы 192  
Трахеиды 612  
Трепел 197  
Трещины 63, 481  
Триплекс 293  
Трубы 262  
- *дренажные* 262  
- *канализационные* 263  
- *металлополимерные* 777  
- *поливинилхлоридные* 777  
- *полимерные* 775  
- *полипропиленовые* 777  
- *полиэтиленовые* 775  
- *стеклопластиковые* 778  
Тепловая обработка 170  
Туфы вулканические 192

## Углерод 326

Удельная поверхность 88  
Удобоукладываемость 471  
Упругость 65  
Усадка 71, 429  
- *влажностная* 429, 501

- *гидравлическая* 429, 501  
- *пластическая* 501  
Условный предел прочности 66  
Усталость 84

## Фанера 642

- *декоративная* 644  
- *бакелизированная* 644  
Фарфор 240  
Фаянс 240  
Феррит 323  
Фибробетон 558  
Фибролит 665  
Флокены 328  
Форма 178  
Фольгоизол 713  
Формование 156  
- *вибрированием* 161  
- *прессованием* 156  
- *трамбованием* 159  
- *пластическое* 159  
- *литьем* 160  
- *центрифугированием* 164  
Фосфогипс 366

## Химические связи 35

- *атомная* 35  
- *водородная* 37  
- *ионная* 35  
- *металлическая* 36

## Цвет 103, 178

Целлюлоза 612

## Цементы 391

- *глиноземистые* 452  
- *кварцевые кислотостойкие* 391  
- *магнийамонийфосфатные* 396  
- *сульфатношлаковые* 400  
- *фосфатные* 394

## Цементит 323

**Ч**исло координационное 33

Червоточины 618

Черепица керамическая 256

Чугун 351

- *высокопрочный* 353
- *ковкий* 355
- *легированный* 354
- *половинчатый* 352
- *с вермикулярным графитом* 353
- *серый* 352

**Ш**амот 531

Шлак 397

Шлакопортландцемент 435

Шпаты полевые 181

Шпон 642

Штукатурка 600

- *акриловая* 601
- *декоративная* 600
- *минеральная* 600
- *силикатная* 601
- *силиконовая* 601
- *тонкослойная* 600
- *фасадная* 600

**Щ**елочестойкость 516, 796

Щиты паркетные 635

**Э**кобрус 394

Эластичность 65

Эластобит 713

Эластомеры 721

Электрокинетический потенциал  
49

Электропроводность 106

Электропрогрев 171

Электротермообработка 494

Электрофрез 48

Эмали 793, 808

Эмульсии 54, 685

Эстрих-гипс 376

Эtringит 375

[illegible]

[illegible]

[illegible]



[illegible]

[illegible]

# КНИГИ ПОЧТОЙ

Заказ можно сделать  
на сайте издательства  
**[www.infra-e.ru](http://www.infra-e.ru)**

| №<br>п/п | Наименование книги                                                        | Кол-<br>во |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1        | Англо-русский словарь дорожника                                           |            |
| 2        | Англо-русский словарь по мостам и тоннелям                                |            |
| 3        | Компьютерные технологии в подготовке и управлении строительством объектов |            |
| 4        | Производство бетонных работ в зимних условиях                             |            |
| 5        | Специальные бетоны                                                        |            |
| 6        | Справочник дорожного мастера                                              |            |
| 7        | Справочник мастера строительно-монтажных работ                            |            |
| 8        | Справочник по строительному материаловедению                              |            |
| 9        | Справочник инженера по отоплению, вентиляции и кондиционированию          |            |
| 10       | Строительные минеральные вяжущие материалы                                |            |

**ДВОРКИН Леонид Иосифович  
ДВОРКИН Олег Леонидович**

## **СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

*Учебно-практическое пособие*

Руководитель проекта  
**К.Н. Уваров**

Главный редактор  
**О.М. Зеленина**

Подписано в печать 20.04.2013.  
Формат 60х84/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура «Таймс».  
Тираж 1500 экз. Заказ №

**Издательство «Инфра-Инженерия»**  
Тел.: 8(911)512-48-48  
E-mail: [infra-e@yandex.ru](mailto:infra-e@yandex.ru)  
[www.infra-e.ru](http://www.infra-e.ru)

---

***Издательство «Инфра-Инженерия»  
приглашает к сотрудничеству авторов  
научно-технической литературы.***