

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Рудненский индустриальный институт  
Кафедра строительства и строительного материаловедения

О.А. Мирюк, Д.М. Тажибаева

ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНИК

«Энергоэффективные строительные материалы»



Рудный, 2018



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Раздел. Керамические материалы	5
1.1 Классификация керамических изделий	5
1.2 Номенклатура керамических изделий	5
1.3 Сырье для производства керамических материалов	23
1.4 Способы производства керамических изделий	26
2 Раздел. Металлические материалы	31
2.1 Общие сведения	31
2.2 Классификация арматурных сталей	32
2.3 Защита металлов от коррозии	40
3 Раздел. Вяжущие вещества	43
3.1 Общие сведения	43
3.2 Типичные стадии технологии получения минеральных вяжущих веществ	44
3.3 Основные характеристики вяжущих веществ	45
3.4 Роль воды в вяжущих системах	46
3.5 Твердение вяжущих веществ	48
3.6 Классификация цементов	51
3.7 Портландцемент	52
3.8 Разновидности портландцемента	54
3.9 Цементы с активными минеральными добавками	58
3.10 Свойства цементного теста	60
3.11 Цементный камень: состав, структура, свойства	64
3.12 Структура цементного камня	65
3.13 Формирование прочности цементного камня	66
3.14 Факторы, влияющие на гидратацию, твердение и прочностные свойства портландцемента	68
3.15 Деформации цементного камня	71
3.16 Морозостойкость цементного камня	73
3.17 Коррозия цементного камня	74
4 Раздел. Бетоны	88
4.1 Общие сведения	88
4.2 Классификация бетонов	88
4.3 Материалы для бетонов	91
4.4 Бетонная смесь	96
4.5 Свойства бетона	103
4.6 Виды современных бетонов	118
5 Раздел. Строительные растворы	127
5.1 Общие сведения	127
5.2 Материалы для изготовления растворных смесей	127
5.3 Свойства строительных растворов	128
5.4 Виды строительных растворов	131
5.5 Сухие смеси	133



6 Раздел. Материалы для энергоэффективного строительства	144
6.1 Общие сведения о теплоизоляционных материалах	144
6.2 Характеристика основных теплоизоляционных материалов	150
6.2.1 Минеральная вата и изделия на ее основе	150
6.2.2 Пеностекло	152
6.2.3 Ячеистые бетоны	154
6.2.4 Теплоизоляционные материалы на основе древесины	161
6.2.5 Теплоизоляционные материалы на основе полимеров	164
6.2.6 Полистиролбетон	169
6.2.7 Жидкая теплоизоляция	172
Список литературы	176

## ВВЕДЕНИЕ

Строительство – ключевая, динамично развивающаяся отрасль, оказывающая огромное влияние на экономику страны и определяющая состояние социальной сферы.

Эффективность, надежность и безопасность строительства в значительной степени определяется строительными материалами, масса и стоимость которых в конструкциях составляет более 50%.

Мир современных строительных материалов – широкий спектр различных по составу и структуре веществ; тысячи наименований изделий, отличающихся конфигурацией, свойствами и назначением.

Строительное материаловедение – наука о составе, строении, технологии изготовления, области применения, безопасности, архитектурной выразительности и долговечности материалов для строительства.

Строительное материаловедение развивалось в длительном временном измерении и прошло путь от самого простого представления о веществе к глубокому пониманию его строения.

На начальном этапе развития в строительном материаловедении преобладало сравнительное изучение свойств веществ и процессов. В дальнейшем, наряду с принципом сравнения, исследования приобрели форму прогнозирования, проектирования, дизайна.

Сегодня практике нужны новые материалы многофункционального назначения, материалы с улучшенными характеристиками и превосходящие по свойствам известные разновидности. Для таких достижений необходимы «прорывные» технологии, позволяющие при минимальных затратах ресурсов получать долговечные материалы.

Строительные материалы классифицируют по различным признакам: происхождение, технологические особенности, назначение и другие.

В учебном пособии рассмотрены искусственные строительные материалы, преимущественно минерального происхождения, наиболее востребованные современным строительством.

Учебное пособие предназначено в качестве дополнительного источника к основной учебной литературе.

## РАЗДЕЛ 1. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

### 1.1 Классификация керамических изделий

Существуют несколько классификаций строительных керамических изделий и материалов, а именно – по плотности, прочности и назначению.

Более обширной является классификация по назначению:

- стеновые – к ним относятся кирпич и камни;
- отделочные – плитки, которые в свою очередь подразделяются на плитки для полов, фасадные, для внутренней облицовки стен;
- кровельные: разновидности глиняной черепицы;
- теплоизоляционные: диатомитовый кирпич, легкие искусственные заполнители для бетона – керамзит, аглопорит;
- огнеупорные - динас, шамот, окисная керамика;
- кислотоупорные – резервуары, трубы, плиты;
- санитарно-технические изделия: умывальники, ванны, раковины, унитаза, трубы дренажные и канализационные.

В некоторых источниках, трубы выделяют в отдельную категорию.

По плотности керамические строительные изделия делят на: плотные, характеризующиеся водопоглощением менее 5% (плитка для полов, дорожный кирпич), и пористые – с водопоглощением более 5% (облицовочные плитки, камни, глиняный кирпич, черепица).

По прочности, морозостойкости делятся на марки (например, марка кирпича 75, 100, 125, 150, 175, 200, 250, 300).

По температуре плавления керамические материалы и изделия подразделяются на:

- легкоплавкие (с температурой плавления ниже 1350°C),
- тугоплавкие (с температурой плавления 1350 – 1580°C),
- огнеупорные (1580 – 2000°C),
- высшей огнеупорности (более 2000°C).

По качеству переработки сырья керамику делят на грубую и тонкую:

- **грубая:** кирпич, черепица, плитки фаянсовые и для полов;
- **тонкая:** фарфор и полуфарфор.

### 1.2 Номенклатура керамических изделий

**Керамический кирпич** – строительный материал, полученный из глин путем формования и обжига.

Кирпич глиняный обыкновенный имеет размеры 250×120×65 мм (одинарный), 250×120×88 мм (утолщенный), 288×138×63 мм (модульный) и 288×138×88 мм (модульный утолщенный). Самая большая грань кирпича называется постелью, боковая – ложком, торцевая – тычком (рисунок 1.1).

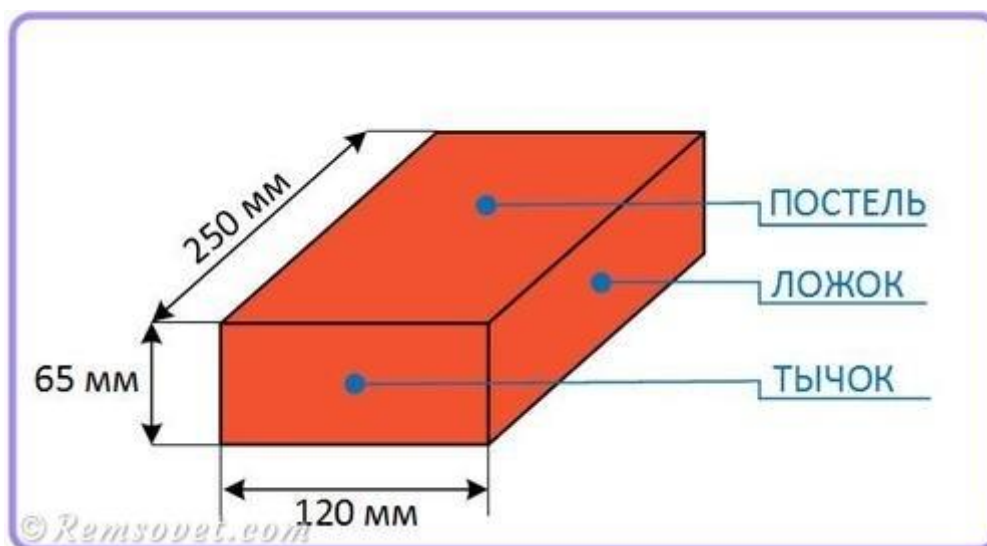


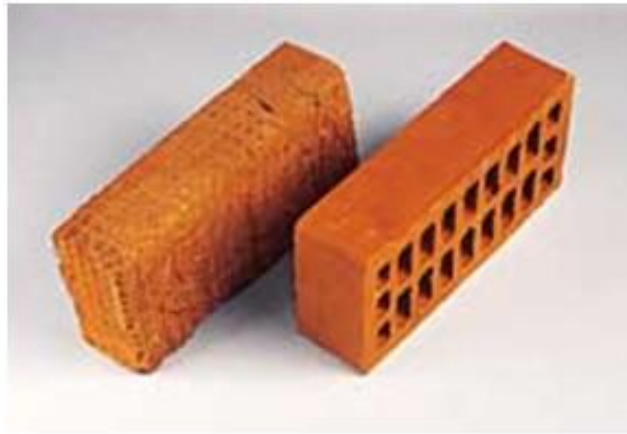
Рисунок 1.1 – Кирпич керамический обыкновенный

Кирпич глиняный обыкновенный применяется для кладки наружных и внутренних стен, столбов, фундаментов, сводов и других частей зданий, в которых полностью используется его высокая прочность.

Обычный строительный кирпич имеет довольно высокую плотность (1600 – 1800 кг/м<sup>3</sup>) и высокую теплопроводность, поэтому приходится возводить наружные стены большей толщины, чем это требуется по расчету на прочность. В подобных случаях более эффективно применение не столь прочного, но менее теплопроводного пустотелого, пористо-пустотелого и легкого кирпича.

Пустотелый кирпич имеет круглые отверстия, прямоугольные или щелевые пустоты. Пористо-пустотелый кирпич получают аналогично пустотелому, но в глину вводят выгорающие добавки. Кирпич строительный легкий изготавливают как из глины с выгорающими добавками, так и из диатомитов или трепелов с выгорающими добавками и без них.

Пустотелый кирпич применяется для наружных и внутренних стен зданий, а также в цоколях зданий выше гидроизоляционного слоя. Его нельзя применять для фундаментов и цоколей зданий ниже гидроизоляционного слоя и для стен помещений с повышенной влажностью. Легкий кирпич используется для наружных и внутренних стен зданий с нормальной влажностью помещений. Виды кирпичей представлены на рисунке 1.2.

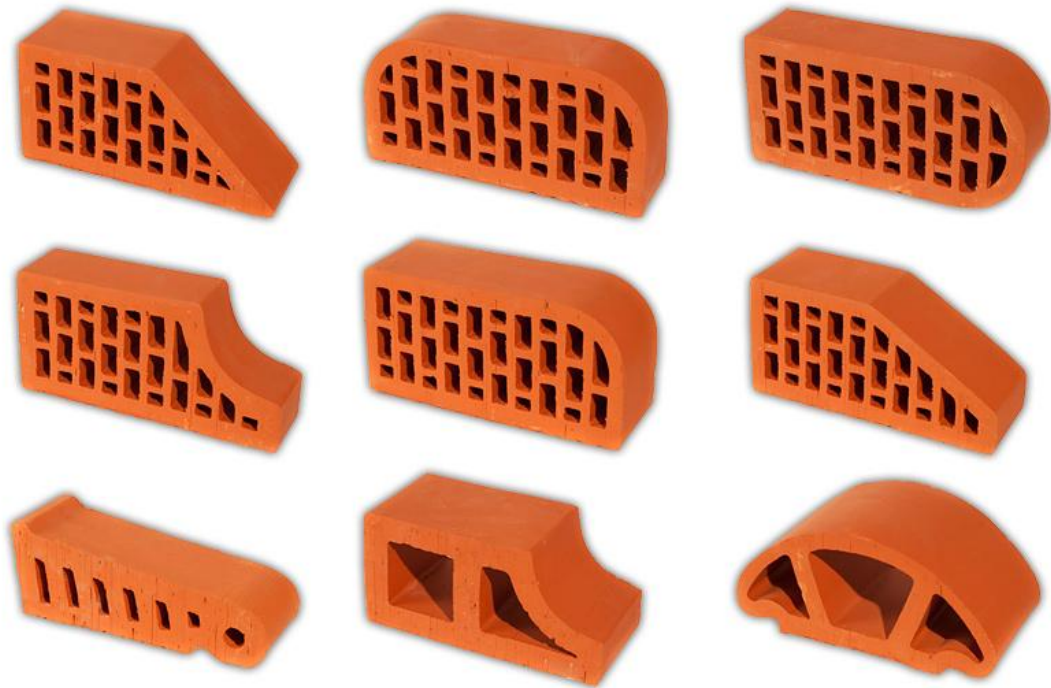


Слева – рядовой кирпич, справа – лицевой

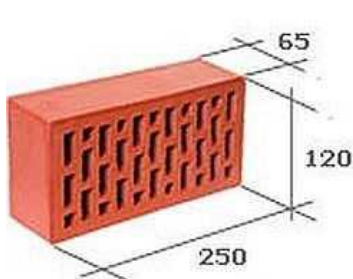


Фактурный кирпич

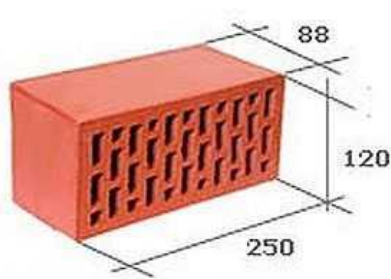




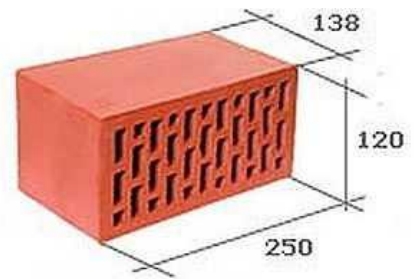
Фасонный кирпич



Одинарный



Полуторный



Двойной

Одинарный, полуторный и двойной кирпичи



Рисунок 1.2 – Виды кирпичей



Кирпич должен быть морозостойким, т.е. выдерживать частые изменения температуры без видимых признаков разрушения, сцепляться накрепко со строительным раствором. Поэтому его пористость должна быть не менее 6–8%, но не более 20 %. Кирпич имеет марки по прочности: 75, 100, 125, 150, 175, 200, 250, 300, что соответствует пределу прочности при сжатии, выраженному в кгс/см<sup>2</sup>. Марки по морозостойкости (выражены в циклах попеременного замораживания и оттаивания): 15, 25, 35, 50. Масса кирпича обыкновенного не должна превышать 4,3 кг, а его теплопроводность составляет 0,6 – 0,8 Вт/(м·К) [1].

Пустотелый кирпич изготавливают со сквозными и несквозными круглыми, щелевидными, реже овальными или квадратными пустотами.

Пустотелые керамические камни имеют следующие размеры (мм):

– камень обычный – 250×120×138;

– камень модульных размеров – 288×138×138;

– камень модульных размеров укрупненный – 288×288×88.

*Керамические камни* имеют больший размер, чем кирпич, поэтому их выпускают только пустотелыми. Их плотность колеблется в пределах 1300–1450 кг/м<sup>3</sup>, марки по прочности 75, 100, 125 и 150. Керамические камни используют для кладки несущих стен одноэтажных и многоэтажных зданий и для внутренних несущих стен и перегородок. Применение этого материала позволяет снизить толщину и массу стеновых конструкций и уменьшить количество швов по сравнению с обычной кирпичной кладкой.

Пустотелый кирпич с плотностью не более 1400 кг/м<sup>3</sup> и камни с плотностью не более 1450 г/м<sup>3</sup> относятся к *эффективным*. Они имеют преимущества перед полнотелым кирпичом, так как обладают пониженной массой и лучшими теплозащитными свойствами, что позволяет уменьшить толщину возводимых стен, сократить расход кирпича на кладку, уменьшить массу строительной конструкции и ее нагрузку на фундамент.

Кроме того, такие изделия не деформируются, а их применение в строительстве, благодаря пониженной теплопроводности, позволяет снизить толщину наружных стен зданий на 25–30 %. Приведенные затраты на 1 м<sup>2</sup> стены, выложенной из эффективного кирпича, снижаются по сравнению с кладкой из полнотелого кирпича на 30 %.

Материалы для наружной (фасадной) облицовки зданий и сооружений включают в себя лицевой кирпич и камни, крупноразмерные облицовочные плиты и фасадную плитку, ковровую мозаику, различные архитектурные детали (терракоту).

*Крупноформатные пустотелые блоки* – новое поколение керамических стеновых материалов. Сохранив в себе преимущества керамического кирпича: экологичность, долговечность, комфортный микроклимат в доме – они за счет своих крупных размеров и высокой пустотности обеспечивают значительную экономию времени и средств на строительные работы, обладают отличными теплоизоляционными свойствами. Они имеют размеры от 250×120×138 до 510×240×215 мм и массу

от 3,8 до 21 кг, марочную прочность М100 и М150, морозостойкость – 50 циклов. Примеры пустотелых блоков приведены на рисунках 1.3 – 1.4.

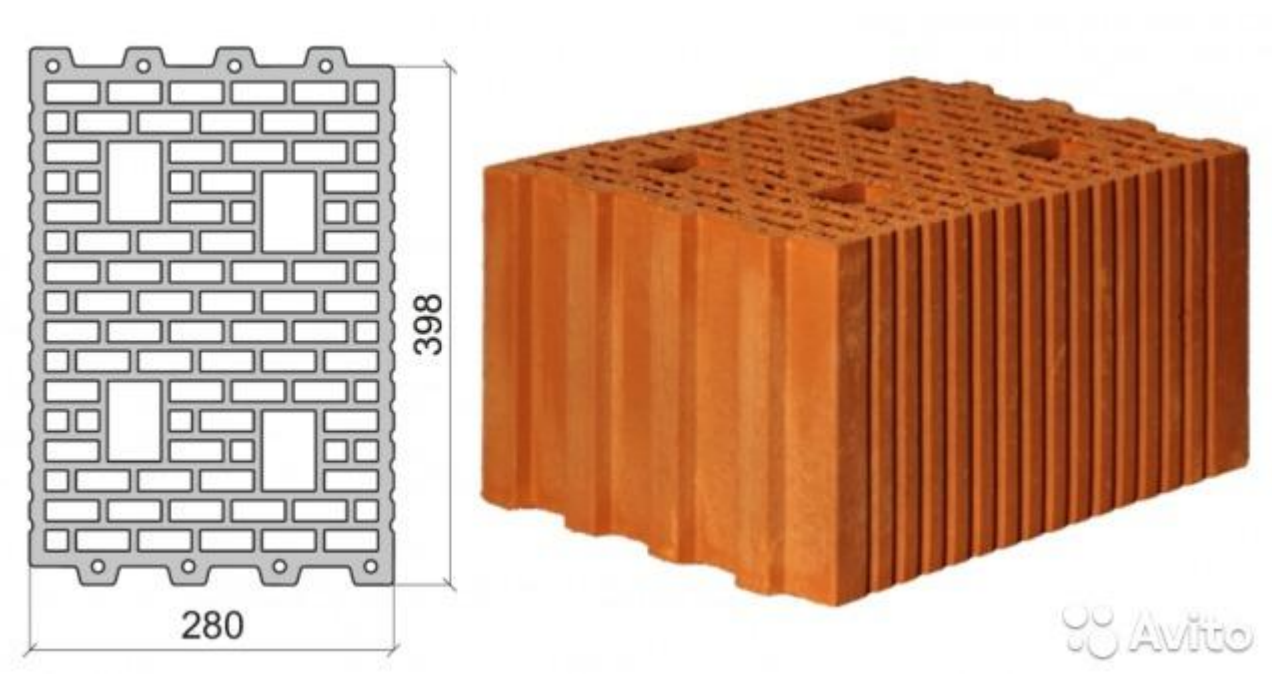
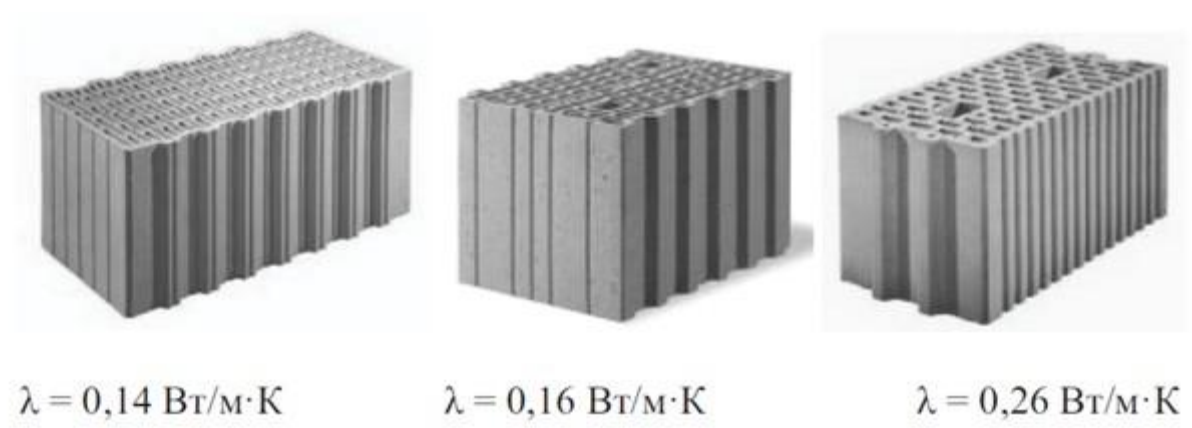


Рисунок 1.3 – Крупноформатные многопустотные керамические блоки

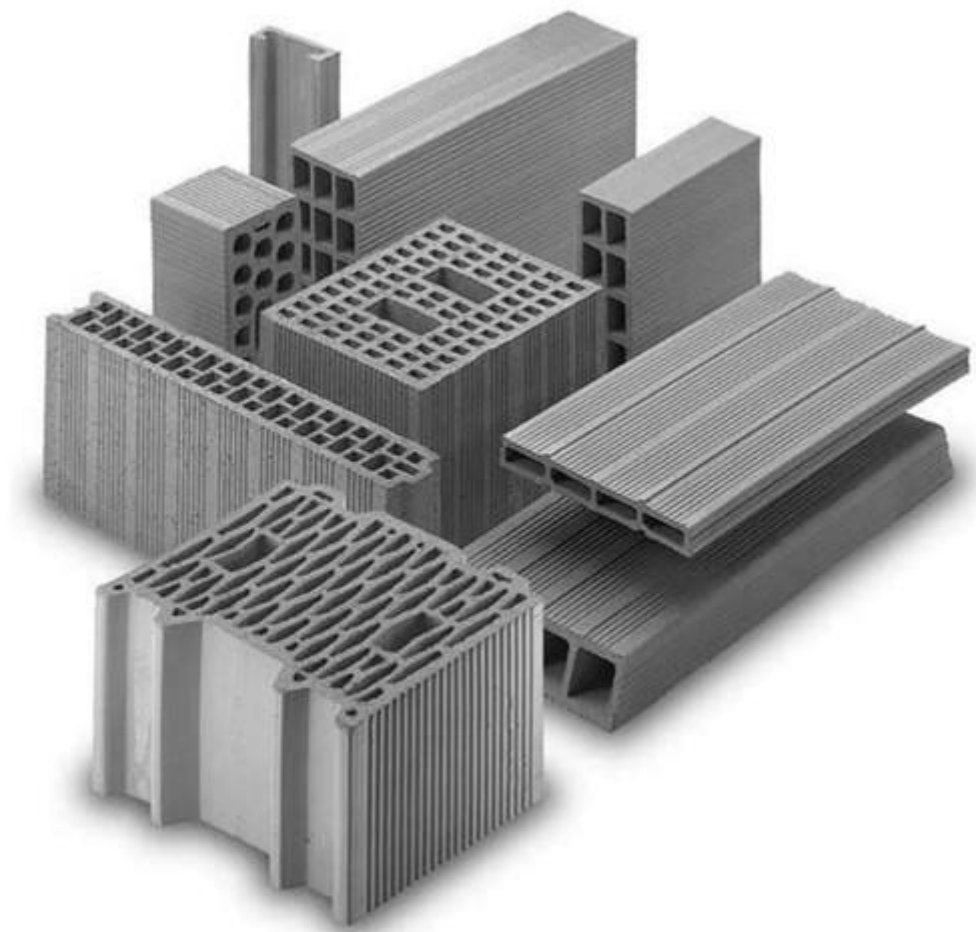
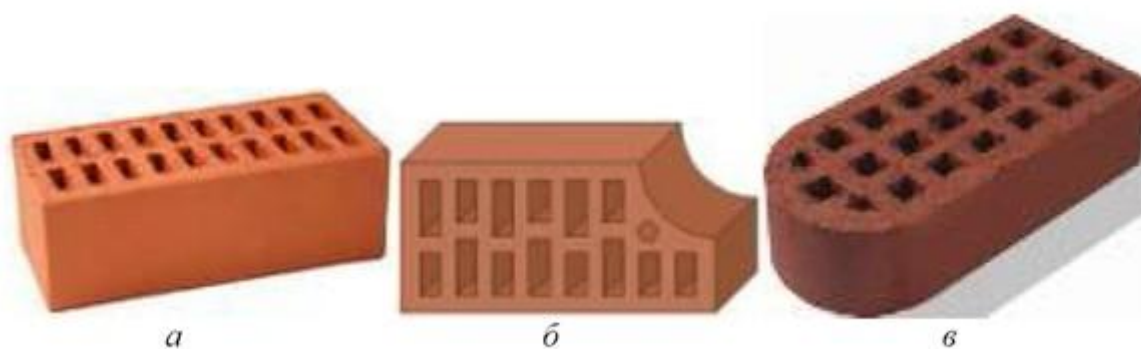


Рисунок 1.4 – Современные керамические материалы

*Лицевой кирпич* отличается от обычного тем, что у него ложка и тычок (или два тычка) имеют улучшенное качество поверхности: гладкая без дефектов поверхность, ровная окраска, возможная рельефная обработка поверхности или ее офактуривание (двухслойное формование, глазурирование, ангобирование), а также окрашивание пигментами. Лицевые поверхности не должны иметь выцветов, высолов, крупных включений и других дефектов [2].

Лицевой кирпич и камни изготавливают как из красножгущихся, так и беложгущихся глин. Марки лицевого кирпича такие же, как и у обычного; морозостойкость – не менее 25 циклов. Выпускают лицевой кирпич и камни различных цветовых тонов, подбирая такой состав сырья и режим обжига, который обеспечивает высокоэстетическую устойчивую окраску. Лицевой кирпич, являясь облицовочным материалом, одновременно играет роль несущего стенового материала. Его изготавливают пустотелым или сплошным. Исходя из назначения и формы, различают следующие виды лицевого кирпича: рядовой (для кладки стен), рядовой профильный (для кладки карнизов, поясков, капителей, колонн и т.п.) и фасонный (для оформления углов, дверных и оконных проемов) (рисунок 1.5).



*а* – рядовой; *б* – рядовой профильный; *в* – фасонный с закруглением

Рисунок 1.5 – Виды лицевого кирпича

**Плиты и плитки фасадные.** Плитки фасадные применяют для облицовки наружных стен и поверхностей стеновых панелей, для отделки лоджий, эркеров, вставок, поясов, обрамления окон и дверных проемов. Эти изделия должны обладать высокой морозостойкостью, водонепроницаемостью, атмосферостойкостью, прочностью и надежностью крепления.

Фасадные плитки обычно изготавливают из беложгущихся глин с добавками и без них, иногда глазуруют. Они подразделяются на плоские, предназначенные для облицовки плоских поверхностей стен, и угловые – для облицовки наружных углов, откосов, проемов, пилястр. В зависимости от формы плитки бывают квадратные, прямоугольные и фигурные.

Крупноразмерные керамические плиты выпускают размером от 500×500 до 1000×1000 мм и толщиной 6–10 мм. Эти плиты крепят на фасаде с помощью металлических раскладок. Один из вариантов таких плит называют *керамогранитом*.

Плиты и плитки для наружной облицовки изготавливают с гладкой и рифленой поверхностью, одноцветными и многоцветными, неглазурованными и глазурованными. Для улучшения сцепления они имеют рифленую тыльную поверхность или пазы с сечением «ласточкин хвост». Глазурь на таких плитках позволяет придавать им необходимую окраску. Они обладают высокими декоративными и эстетическими свойствами и предназначены для облицовки фасадов зданий одновременно с кладкой стен из мелкоштучных изделий. Отделка фасадов керамическими плитками не только очень выразительна с архитектурной точки зрения, но и долговечна. Вместе с тем они сложны в изготовлении, дороги, громоздки и требуют много высококачественного сырья, вследствие чего выпускаются в ограниченном количестве [3, 4].

*Керамический гранит* – этот материал появился совсем недавно, но стал очень популярным. По внешнему виду (зернисто-кристаллической структуре и цветовой гамме) он напоминает природный гранит. Физико-механические свойства керамогранита близки, а порой и превосходят свойства гранита природного. Керамогранит отличается очень низкой

пористостью, его водопоглощение не превышает 0,5 %, что предопределяет высокую морозостойкость материала.

Плиты из керамогранита выпускают больших размеров – от 20×20 до 60×60 и 60×120 см при толщине от 7 до 30 мм. Более прочными и популярными считаются плиты толщиной 10–14 мм. Они особенно хороши для пола в производственных помещениях. Керамогранит имеет богатую гамму расцветок. Поверхность плит, в зависимости от вида механической обработки, может быть полированной, шлифованной или шероховатой. Области применения плит и плиток из керамогранита самые разнообразные: от облицовки фасадов зданий и устройства покрытий полов в магазинах, банках до отделки стен и полов в жилых помещениях.

Главная особенность керамогранита – его высокая прочность и низкая пористость. Художественный эффект, которого можно добиться с помощью этого материала, и его отличные технические характеристики вывели керамогранит в лидеры современного рынка вентилируемых фасадов. К тому же он не требует практически никакого ухода.

Плиты из керамогранита в точности имитируют различные виды натурального камня: мрамор, гранит и другие породы. Керамогранит полностью сохраняет структуру и рисунок натурального камня, но не имеет дефектов, снижающих прочность природных каменных материалов [3].

Возможность изготовления крупноформатных плит из керамогранита – его главное отличие от обычной керамики. Крупный формат позволяет формировать эксклюзивные фасады, придает зданиям строгие, элегантные очертания, обеспечивает максимальную функциональность (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Отделка фасада керамогранитом

Керамический гранит – экологически чистый материал, поскольку, кроме всех перечисленных свойств, он также не выделяет вредных веществ в окружающую среду даже при довольно сильном нагревании, а его химическая инертность и низкое водопоглощение (0,1 – 0,2 мас. %) являются залогом бактериостатичности. Благодаря тому, что компоненты для производства керамогранита тщательно отбираются по показателю радиоактивности, конечный продукт гарантированно избавлен от повышенного фона, чего нельзя однозначно сказать о многих сортах природного гранита и других вулканических породах (базальт, лабрадорит, габбро).

Керамогранитом можно облицовывать не только внутренние и наружные стены, навесные вентилируемые фасады, где он просто незаменим, но и укладывать на балконах или на открытых террасах. Его физико-механические свойства высоки. Основные достоинства:

- высокая прочность при сжатии;
- устойчивость к истиранию;
- низкая пористость (практически не поглощает влагу);
- стойкость к резким перепадам температуры;
- высокая морозостойкость;
- устойчивость к химическим реагентам и загрязнениям;
- стойкость к процессу старения под влиянием времени и ультрафиолета;
- однородность поверхностного и объемного состава;
- широкая гамма цветов и оттенков;
- высокие потребительские и эксплуатационные характеристики.

Среди недостатков следует отметить высокую хрупкость – у него некая схожесть по структуре со стеклом, а также низкую прочность на изгиб.

**Коврово-мозаичные плитки (ковровая керамика)** представляют собой мелкогабаритные тонкостенные плитки (глазурованные и неглазурованные), наклеенные в виде ковров на бумажную основу. Лицевая поверхность плиток покрывается прозрачной или глухой, блестящей или матовой, белой или цветной глазурью (рисунок 1.7). Применяют покрытия с цветными глазурями под названием «березка», «мимоза», «малахит» и тому подобное, которые имитируют природные материалы.





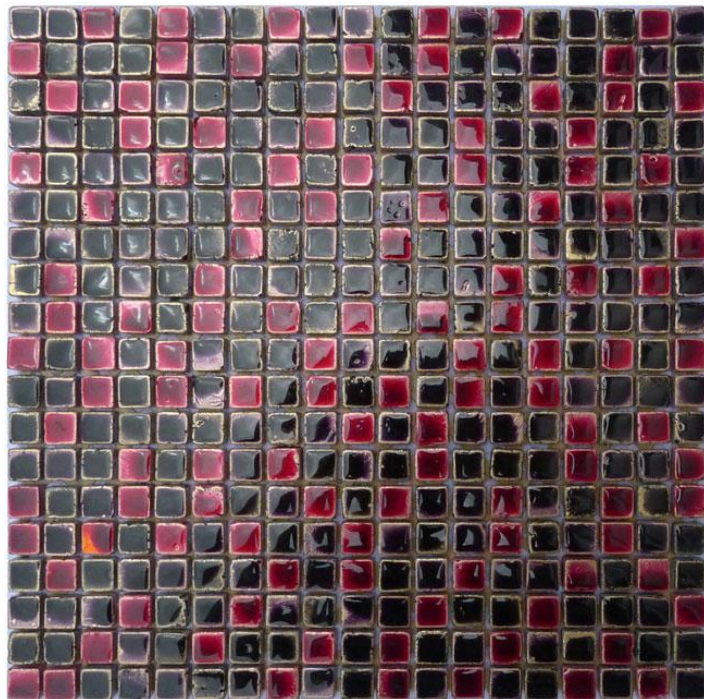
Плитка с орнаментом



Композиция из двух плиток



Керамическая плитка «под камень»



Мозаичная плитка





Панно из керамических плиток

### Рисунок 1.7 – Виды плиток для внутренней отделки

Плитки для внутренней облицовки выпускают разнообразных типоразмеров. Их часто называют «кафельными». Они имеют пористую структуру и с лицевой стороны покрываются глазурью. Пористый черепок снижает массу плитки и улучшает сцепление с клеящим материалом, а глазурь придает декоративность и гигиеничность. Наносимые глазури могут быть цветными и бесцветными, прозрачными и глухими, гладкими и рельефными, одноцветными и многоцветными.

Традиционным размером плиток на территории стран СНГ был 15×15 см. Сейчас популярны более крупные прямоугольные плитки, например, размером 20×30 см. Несмотря на различные фасоны и размеры толщина плиток не должна превышать 6 мм, для плиточных плиток максимально допустимая толщина составляет 10 мм. Современные плитки имеют высокую точность размеров и формы. В настоящее время на рынке имеется не только большой выбор импортной и отечественной плитки различных размеров, цветов и рисунков, но и дополнительных элементов к ним (бордюры, уголковые плитки и т.д.). Все это позволяет обеспечить высокое качество отделки.

Наряду с декоративными качествами, плитки должны быть термостойкими, их водопоглощение не должно превышать 16 мас. %. Они находят применение в помещениях, требующих повышенной чистоты в жилых, общественных и промышленных зданиях, в санитарно-технических узлах, а также в помещениях с повышенной влажностью.

В отличие от фасадных, к плиткам для внутренней облицовки не предъявляют требований по морозостойкости. Вместе с тем они имеют высокую водонепроницаемость, гигиеничность, долговечность и эстетичность. Именно они и призваны создавать разнообразную облицовку

стен санузлов жилых зданий и гостиниц, бытовых помещений предприятий, многочисленных помещений больниц и поликлиник, столовых и кухонь, бань и прачечных, плавательных бассейнов и станций метрополитена. Плитки для внутренней облицовки разнообразны по форме, цвету, фактуре и рисунку на лицевой поверхности. Без них невозможно квалифицированное создание современных интерьеров. Их нельзя использовать для наружной облицовки, так как пористый материал зимой быстро разрушается.

**Плитки для полов** принадлежат к группе каменно-керамических изделий, отличительной особенностью которых является малая пористость, высокая плотность, большая сопротивляемость истирающим усилиям, огнестойкость, устойчивость против атмосферных воздействий. Благодаря этому плитки для полов широко применяют для настилки полов в различных промышленных, жилищно-бытовых и общественно-культурных зданиях. Главным образом эти плитки используются в помещениях, где предъявляются исключительно высокие требования к чистоте (предприятия пищевой промышленности, больницы, школы, бытовые помещения, санузлы зданий); где полы подвергаются воздействию жиров, кислот, щелочей и других химических веществ (предприятия химической промышленности, лаборатории); где полы вследствие большого движения людей подвергаются сильному истиранию (железнодорожные вокзалы, станции метро); где полы являются декоративным элементом в архитектурном оформлении помещений (вестибюли общественных зданий, клубы, театры, магазины).

Для их изготовления используют качественные огнеупорные и тугоплавкие пластичные глины с добавками или без них. Формуют плитки прессованием из полусухих масс под давлением 25 – 30 М Па. Производство плиток для полов возникло во второй половине XIX в. в немецком городе Метлах, отсюда и их устаревшее название «метлахские». Исходя из формы и размеров, различают плитки треугольные, квадратные, прямоугольные, шести- и восьмигранные, их половинки и т.д. Лицевая поверхность плиток бывает гладкой, шероховатой, тисненой, рельефно-глазурованной, глазурованной, орнаментированной в то время как их тыльная поверхность снабжается бороздками глубиной 1 – 2 мм для лучшего соединения с вяжущим раствором. Обычно плитки для полов изготавливаются белого, желтого и красного цветов; другие цвета плиток получают по специальному заказу [3, 5].

Наименьший размер плиток по длине и ширине составляет 48 мм, наибольший – 300 мм. Плитки, имеющие размер по длине и ширине до 50 мм, относятся к ковровой мозаике и выпускаются в виде ковров. Толщина плиток колеблется в пределах 10– 15 мм, мозаичных – 4–6 мм. Мозаичные плитки отличаются друг от друга цветом или узором.

Плитки для полов должны иметь правильную геометрическую форму, а лицевая поверхность быть свободной от пятен, пузырей и царапин, обладать высокой износостойкостью. Водопоглощение – не более 4 %. Такие плитки хорошо моются (мало впитывают влаги), но вследствие сравнительно большой теплопроводности не применяются в жилых помещениях (полы

холодные). Тротуары также нельзя выкладывать такими плитками, так как зимой они очень скользкие. Вместе с тем в связи с появлением подогреваемых полов круг помещений, где целесообразно применение таких плиток, будет расширяться. Архитектурная майолика применяется для облицовки фасадов и внутренних стен станций метрополитена, выставочных залов, для обрамления окон, дверей, балконов и др. Используют ее и для изготовления предметов декоративно-художественного назначения (вазы, настенные блюда, скульптура). Из-за высокой пористости (до 15 %), недостаточной прочности на изгиб (30–50 МПа), невысокой термостойкости и склонности к растрескиванию майоликовые изделия имеют ограниченное применение. Наиболее широкое распространение получила фаянсовая майолика.

В настоящее время керамические санитарно-технические изделия изготавливаются из фарфора, полуфарфора и фаянса способом шликерного литья. К ним относятся: умывальные столы, унитазаы, ванны, бидэ, писсуары, бачки смывные, фонтанчики питьевые и т.п. (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Санитарно-технические изделия

Данные изделия относятся к типу тонко керамических, отличаются пластичной и скульптурной формой и предназначены для создания бытового комфорта. Все санитарные керамические изделия глазуруют для придания им необходимых свойств и улучшения внешнего вида. Керамические санитарно-технические изделия отличаются декоративностью, универсальной химической стойкостью; благодаря твердой и гладкой поверхности легко чистятся, длительное время сохраняя свои свойства. Недостаток таких

изделий, как и керамики в целом, – высокая хрупкость. Несмотря на это керамика остается лучшим материалом для санитарно-технических изделий [3, 6].

*Керамическая черепица* – один из старейших, долговечных и огнестойких кровельных материалов. В античную эпоху черепицей покрывали храмы и жилища. Позднее ее стали применять в странах с более суровым климатом. Дешевые кровли из соломы, теса и гонта (деревянной дощечки) были недолговечны и часто служили причиной пожара.

Появление черепицы объясняется требованиями огнестойкости. Но в романской и готической архитектуре зодчие отдавали предпочтение черепице не только из-за данной особенности, оценивая высокую надежность и эстетичность этого материала. На протяжении многих веков черепица украшала крыши зданий и в Древнем Китае, воспроизводя своими очертаниями и цветом силуэты окрестных холмов.

Черепицу изготавливают из лучших сортов пластичных кирпичных глин, отощенных молотым черепичным боем или кварцевым песком. Она должна быть хорошо обожжена, иметь в изломе мелкозернистое строение, выдерживать сосредоточенную нагрузку не менее 7 МПа, издавать при ударе чистый звук, обладать морозостойкостью не менее 25 циклов. Высокие эксплуатационно-технические качества черепицы характеризуют также ее высокая огнестойкость, химическая стойкость, водонепроницаемость. Вместе с тем она придает зданиям высокую архитектурно-художественную форму, эстетична, долговечна и надежна (рисунок 1.9). Однако производство кровельной черепицы трудоемко, возникает необходимость большого уклона крыш (не менее 30°), кровля из нее отличается значительной массой, что требует особой прочности конструкции строения и высокой трудоемкости кровельных работ [3, 7].



Рисунок 1.9 – Разноцветная керамическая черепица



Кровельная черепица доказала свое право занимать лидирующие позиции на рынке кровельных материалов многовековой практикой. Натуральная черепица является одним из древнейших кровельных материалов, используемых строителями на протяжении многих веков. И сегодня около 87 % крыш в центральной и западной Европе покрыты натуральной черепицей.

Керамические трубы имеют две разновидности: канализационные и дренажные. *Канализационные* представляют собой плотные, спекшиеся, водонепроницаемые керамические изделия цилиндрической формы с раструбом на одном конце. Их покрывают снаружи и изнутри химически стойкой глазурью. Наличие тонкого слоя глазури на поверхности труб обеспечивает их высокую водонепроницаемость, стойкость к действию кислот и щелочей (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Трубы керамические

Канализационные трубы предназначены для устройства производственных и хозяйственно-фекальных канализационных сетей, для транспортирования сточных вод и жидких отходов химических производств. Иногда их применяют для сооружения водосточных сетей в агрессивных грунтовых водах.

*Дренажные* трубы – изделия, предназначенные для сбора и отвода грунтовых вод с целью понижения их уровня, осушения почвы и массива под

сооружение. Их изготавливают как неглазурованными без раструбов, так и глазурованными с раструбами различных диаметров [3].

**Керамические изделия специального назначения.** К ним относятся теплоизоляционные, кислотоупорные и огнеупорные изделия.

К **теплоизоляционной керамике** относятся эффективные пористые и пустотелые кирпичи и камни, керамзит и аглопорит. Об эффективности и назначении пористых и пустотелых кирпичей и камней было сказано в соответствующем разделе, поэтому здесь речь пойдет о керамзите и аглопорите.

*Керамзитовый гравий* – искусственный пористый материал ячеистого строения с преимущественным содержанием закрытых пор, получаемый путем вспучивания легкоплавких глинистых пород при ускоренном обжиге. Гранулы керамзитового гравия имеют форму, приближенную к сферической. Характерной особенностью керамзита является его относительно высокая прочность при малой плотности. Это позволяет получать на его основе легкий бетон и изделия из него с высоким коэффициентом конструктивного качества (0,25 против 0,18 для обычного бетона той же прочности).

Керамзитовый гравий, в зависимости от насыпной плотности, разделяют на 12 марок ( $\text{кг/м}^3$ ): 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 700, 800. Чем ниже насыпная плотность, тем выше марка. В зависимости от свойств керамзит применяют для изготовления керамзитобетона и конструктивного железобетона, для теплоизоляционных засыпок и других целей.

*Аглопорит* – искусственный легкий пористый материал, получаемый из глинистого легкоплавкого сырья его термической обработкой на агломерационных машинах с последующим дроблением. В зависимости от размера зерен аглопорит (керамический щебень) подразделяют на фракции (мм): мелкий – 5–10, средний – 10–20 и крупный – 20–40.

Аглопорит используется в основном как заполнитель для легких бетонов при изготовлении из них стеновых изделий – однослойных панелей, крупных и мелких блоков, панелей перекрытий, для устройства теплоизоляционных засыпок и прочих видов строительных работ.

К **кислотоупорным** керамическим изделиям относятся плотные спекшиеся изделия, газо- и водонепроницаемые, с высокой механической прочностью и химической стойкостью при длительном воздействии кислот, щелочей и газов. Эти изделия представляют собой кислотоупорные кирпичи и плитки, применяемые для футеровки реакционных аппаратов, котлов, смесителей, хранилищ, сосудов различного назначения. Для повышения коррозионной стойкости некоторые изделия покрываются кислотоупорной глазурью.

Керамические кислотоупорные изделия широко используются в химической, текстильной, целлюлозно-бумажной, гидролизной, фармацевтической, электрохимической и других отраслях промышленности.

**Огнеупорами** называются материалы, способные в процессе эксплуатации в промышленных тепловых установках длительно выдерживать различные механические и химические воздействия при температурах выше  $1000^{\circ}\text{C}$ . Они применяются в металлургической, керамической и цементной промышленности для кладки и футеровки обжиговых печей. Их огнеупорность должна быть от  $1580$  до  $1770^{\circ}\text{C}$ . Материалы с огнеупорностью  $1770 - 2000^{\circ}\text{C}$  называются высокоогнеупорными [3].

### 1.3 Сырье для производства керамических материалов

Основным сырьевым материалом для производства строительных керамических изделий является глинистое сырье, применяемое в чистом виде, а чаще в смеси с добавками - отошающими, порообразующими, плавнями, пластификаторами и др.

*Глинистое сырье* (глины и каолины) – продукт выветривания изверженных полевошпатных горных пород, содержащий примеси других горных пород. Глинистые минеральные частицы диаметром  $0,005$  мм и менее обеспечивают способность при затворении водой образовывать пластичное тесто, сохраняющее при высыхании приданную форму, а после обжига приобретающее водостойкость и прочность камня.

Помимо глинистых частиц в составе сырья имеется определенное содержание пылевидных частиц с размерами зерен  $0,005 - 0,16$  мм и песчаных частиц с размерами зерен  $0,16 - 2$  мм.

Глинистые частицы имеют пластинчатую форму, между которыми при смачивании образуются тонкие слои воды, вызывая набухание частиц и способность их к скольжению относительно друг друга без потери связности. Поэтому глина, смешанная с водой, дает легко формующую пластичную массу. При сушке глиняное тесто теряет воду и уменьшается по объему. Этот процесс называется *воздушной усадкой*. Чем больше в глинистом сырье глинистых частиц, тем выше пластичность и воздушная усадка их. В зависимости от этого глины подразделяются на высокопластичные, среднепластичные, умеренно-пластичные, малопластичные и непластичные. **Высокопластичные** глины имеют в своем составе до  $80 - 90\%$  глинистых частиц, число пластичности более  $25$ , водопотребность более  $28\%$  и воздушную усадку  $10 - 15\%$ . **Средне-и умеренно-пластичные** глины имеют в своем составе  $30 - 60\%$  глинистых частиц, число пластичности  $15 - 25$ , водопотребность  $20 - 28\%$  и воздушную усадку  $7 - 10\%$ . **Малопластичные** глины имеют в своем составе от  $5\%$  до  $30\%$  глинистых частиц, водопотребность менее  $20\%$ , число пластичности  $7 - 15$  и воздушную усадку  $5 - 7\%$ . Непластичные глины не образуют пластичное удобоформируемое тесто.

Глины с содержанием глинистых частиц более  $60\%$  называют «жирными», отличаются высокой усадкой, для снижения которой в глины

добавляют «отощающие» добавки. Глины с содержанием глинистых частиц менее 10-15% - «тощие» глины, в них при производстве изделий вводят тонкодисперсные добавки, например, бентонитовую глину.

Химический состав глин выражается содержанием и соотношением различных оксидов. В керамическом сырье содержание важнейших оксидов колеблется в широких пределах:  $\text{SiO}_2$  – 40 – 80%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 8 – 50%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0 – 5%;  $\text{CaO}$  – 0,5 – 25%;  $\text{MgO}$  – 0 – 4%;  $\text{R}_2\text{O}$  – 0,3 – 5%.

Для изготовления отдельных видов огнеупорных теплоизоляционных изделий применяют глинистое сырье из трепелов и диатомитов, состоящие в основном из аморфного кремнезема, а для производства легких заполнителей используют перлит, пемзу, вермикулит.

В настоящее время природные глины в чистом виде редко являются кондиционным сырьем для производства керамических изделий. В связи с этим их применяют с введением добавок различного назначения.

**Глазури и ангобы.** Некоторые виды керамических изделий для повышения санитарно-гигиенических свойств, водонепроницаемости, улучшения внешнего вида покрывают декоративным слоем - глазурью или ангобом.

**Глазурь** – стекловидное покрытие толщиной 0,1 – 0,2 мм, нанесенное на изделие и закрепленное обжигом. Глазури могут быть прозрачными и глухими (непрозрачными) различного цвета. Для изготовления глазури используют: кварцевый песок, каолин, полевого шпат, соли щелочных и щелочноземельных металлов. Сырьевые смеси размалывают в порошок и наносят на поверхность изделий в виде порошка или суспензии перед обжигом.

**Ангобом** называется нанесенный на изделие тонкий слой беложгущейся или цветной глины, образующей цветное покрытие с матовой поверхностью. По свойствам ангоб должен быть близок к основному черепку.

Добавки к глинам вводятся для регулирования свойств керамики и снижения расхода дефицитных глин. По влиянию на свойства они делятся на:

- отощающие,
- флюсующие,
- выгорающие,
- пластифицирующие,
- и специального назначения.

Отощающие добавки – это материалы, снижающие пластичность и усадку глин в сушке и обжиге. К ним относятся: кварц, шамот, золы, шлаки и др.

**Шамот** изготавливают обжигом огнеупорных или тугоплавких глин при температурах 1000...1400°C. Его применяют как отошитель керамических масс, при производстве облицовочных плиток, фарфора и фаянса, шамотных огнеупоров. Шамот в отличие от других отошителей не понижает огнеупорности масс. Зерновой состав и количество шамота определяются рецептурой массы для разных видов изделий. Лучше применять его

тонкозернистым и при совместном помоле с глинистыми минералами для равномерного распределения в массе.

На многих керамических заводах вместо шамота применяют измельченный бой готовых изделий или утильного обжига, а также бой огнеупоров, который предварительно сортируют и очищают от загрязнений. На кирпичных заводах вместо шамота используют молотый обожженный кирпич. Но количество этих отходов невелико, поэтому они не оказывают заметного влияния на свойства масс. Применение боя и отходов кирпича важнее с точки зрения их утилизации, создания безотходных технологий и охраны окружающей среды.

*Дегидратированная глина* применяется при недостатке отошителей. Она получается нагреванием обычной глины до 600...700°C, когда та теряет пластичность при удалении химически связанной воды. Ее применяют чаще в производстве грубой строительной керамики. Это позволяет снизить сроки сушки без появления трещин на изделиях, расширить базу отошителей.

*Известняк* является отошающей и разрыхляющей добавкой. При нагревании до 910°C карбонаты разлагаются на CO<sub>2</sub> и CaO, поэтому нельзя применять известняк размером более 0,63 мм, чтобы исключить растрескивание керамики. Его надо применять тонкозернистым и в небольших количествах. При 1000°C CaO вступает в реакцию с другими оксидами массы, особенно с щелочными. С кварцем он образует волластонит (Ca<sub>3</sub>[Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub>]), упрочняющий керамику. Скорость реакции возрастает с повышением температуры обжига и ростом количества легкоплавких соединений, содержащих CaO. Присутствие извести в глинистых массах понижает температуру спекания, но уменьшает интервал спекания, затрудняя обжиг и создавая опасность деформации изделий. Из карбонатов кальция в состав керамических масс обычно вводят мел, так как он состоит из более тонких частиц, легче размалывается и дешевле мрамора. Однако после обжига мел дает более темную, чем мрамор, окраску керамики. Добавка мела в массы, обжигаемые не до спекания и покрываемые глухими свинцово-оловянными глазурями, полезна, так как при этом повышается пористость изделий, в результате чего лучше закрепляется глазурь на керамике.

*Отходы керамзитового и аглопоритового производства* – это соответственно уносы из пылеосадительных камер вращающихся керамзитовых печей и возврат аглопоритового производства. Их целесообразно использовать для повышения прочности изделий при хороших сушильных свойствах сырья, либо в качестве отошителя к чувствительному к сушке сырью в комбинации с более крупнозернистыми добавками [9].

Флюсующие материалы (плавни) – это материалы, взаимодействующие в обжиге с глинистыми минералами с образованием более легкоплавких соединений. Поэтому введение в состав массы плавней улучшает степень спекания и снижает температуру обжига. Плавни делят на две группы: флюсующие, имеющие низкую температуру плавления, – полевые шпаты, пегматиты, сиениты – и материалы с высокой температурой плавления, но

дающие при обжиге легкоплавкие соединения с компонентами массы – мел, доломит, тальк.

Выгорающие добавки выгорают в обжиге почти целиком (за исключением зольной части). В технологии керамики они чаще применяются при производстве стеновых материалов. К ним относятся опилки, уголь, золы ТЭЦ, негорелые шахтные породы.

**Пластифицирующие добавки.** Их вводят с целью повышения пластичности сырьевых смесей при меньшем расходе воды. К ним относятся высокопластичные глины, бентониты, лигнин (тонкодисперсный отход от переработки древесины), поверхностно-активные вещества (Сульфитно-спиртовая барда – ССБ, сульфитно-дрожжевая бражка – СДБ, смола нейтрализованная возухововлекающая – СНВ и др.). Введение этих добавок улучшает формовочные свойства массы, облегчает сушку сырца, увеличивает прочность изделий [8, 9].

**Специальные добавки** – для повышения кислотостойкости керамических изделий в сырьевые смеси добавляют песчаные смеси, затворенные жидким стеклом. Для получения некоторых видов цветной керамики в сырьевую смесь добавляют оксиды металлов (железа, кобальта, хрома, титана и др.) [8].

#### 1.4 Способы производства керамических изделий

Технология изготовления керамических материалов состоит из следующих операций: переработка глиняной массы, формование изделий, сушка и обжиг. Существуют несколько способов изготовления керамических изделий: пластический, полусухое прессование, жесткое формование, шликерный, комбинированный способ.

Рассмотрим особенности каждого способа производства.

*Пластический способ* является классическим или традиционным способом, так как получил широкое распространение на предприятиях по изготовлению керамических материалов. Глинистые материалы естественной (карьерной) влажности при необходимости смешивают с водой, до получения сырьевой массы влажностью 18 – 28%. При пластическом способе производства глинистые частицы покрыты слоем воды, она уменьшает трение между ними, обеспечивая легкое скольжение, относительно друг друга.

Однако производство изделий из масс с высокой формовочной влажностью – процесс многопередельный, требующий корректировки природных свойств глинистого сырья (дробление, помол, вылеживание, увлажнение и перемешивание).

Наличие карбонатных включений обуславливает введение в технологию дополнительных валцов тонкого помола или сухую подготовку массы в шахтных мельницах и других аналогичных агрегатах [10].

Подготовленное глиняное тесто направляют в ленточный вакуумный пресс, откуда выходит непрерывный глиняный брус, который в



последующем разрезается с помощью струн или ножей на требуемые размеры сырца. Меньшая запыленность предприятия, но большой расход условного технологического топлива (количество воды, подлежащей удалению в 4 раза больше, чем при полусухом способе). Недостатком является то, что необходимо сырец перекладывать после сушки на обжиговые вагонетки, т.е. отдельный процесс сушки в камерных сушилках и процесс обжига в туннельных печах. Пластическим способом выпускают керамический кирпич, камни, черепицу, трубы и др.

*Полусухой способ* предусматривает сушку глинистого сырья (до влажности 8 – 12%), затем дробление, размалывание, перемешивание. Прессование каждого сырца-образца происходит под давлением до 15 МПа. Положительным свойством является четкая форма, точные размеры, прочные углы и ребра формуемого кирпича, но прочность ниже, чем у кирпича пластического формования, это объясняется тем, что сцепление лучше в образце повышенной влажности. При полусухом способе частицы не набухают полностью и не сообщают массе пластичности и подвижности. Вода смачивает наружную поверхность глинистых частиц. Небольшое количество воды снижает трение между минеральными составляющими.

При полусухом способе подготовки сырья требуется на 30% меньше производственных площадей (при одинаковой мощности завода), и на 20 – 24% меньше обслуживающего персонала, чем при пластическом способе. Преимуществом этой технологии является возможность садки отформованного сырца на печную вагонетку, что исключает из технологической линии операцию укладки сырца на сушильную вагонетку и перекладку его на печную. Кирпич до сушки необходимо выдерживать в цехе в течение 12 – 48 ч для усреднения влажности во всем его объеме.

Сокращается также продолжительность производства изделий, что создает лучшие условия для автоматизации производства [11]. Изделия, изготавливаемые полусухим способом: облицовочные плитки, плитки для полов и другие тонкостенные керамические изделия.

*Шликерный способ* подготовки массы целесообразно применять при использовании глинистого сырья повышенной влажности, легко размокающего в воде и содержащего каменные включения, подлежащие удалению. Особенность шликерного способа заключается в том, что измельченные сырьевые материалы смешиваются с большим количеством воды (влажность более 45%). При литевом способе – шликер представляет собой массу с малой концентрацией дисперсионной фазы, в результате частицы могут неограниченно перемещаться относительно друг друга.

Шликерный способ подготовки массы обеспечивает наилучшее разрушение природной текстуры сырья [11]. Применяют при производстве фарфоровых и фаянсовых изделий, облицовочных плиток и др.

*Способ жесткого прессования* можно рассматривать с двух сторон:

- первый способ - представляет собой сухую переработку и формовку изделий по пластическому способу, при условии карьерной влажности глины не менее 16 – 17 %. Увлажнение порошка глинистой массы происходит в

мешалке пресса, это позволяет формировать изделия при влажности на 3 – 4 % ниже нормальной с давлением 10 МПа.

- второй способ – из массы пониженной влажности (12 – 14 %) до обработки ее на машинах или непосредственно перед прессом вводят сухие добавки либо используют предварительно подсушенную глину с таким расчетом, чтобы можно было прессовать изделия из масс с указанной выше влажностью.

Преимуществом метода жесткого прессования является возможность укладки отформованного сырца на печную вагонетку, что исключает из технологической линии операцию укладки сырца на сушильную вагонетку и перекладку его на печную.

Комбинированный способ заключается в подготовке сырья по способу полусухого прессования с последующим затворением водой и формированием по пластическому способу. Такая технология обеспечивает высокую степень гомогенизации шихты и качества керамических изделий [8].

### 1.5 Глоссарий

Ангоб	вид покрытия для декорирования керамики, отличающийся непрозрачностью и отсутствием блеска; содержит в исходном сырье значительное количество глинистого вещества, не образует стекловидного слоя
Глазурь	стекловидное тонкое покрытие на поверхности керамического тела, образуемое в процессе <i>политого обжига</i> для придания изделию декоративности, увеличению прочности и т.д.; часто <i>глазурью</i> называют исходный глазурный шликер.
Глина	осадочная порода, содержащая в основном гидроалюмосиликаты, а также кварцевый песок, полевые шпаты, карбонаты, оксиды, и т.д. При затворении водой образует пластичную массу.
Каолин	глинистый материал белого цвета с высокой огнеупорностью, состоящий в основном из минерала каолинита (гидроалюмосиликата). Название от китайского "као-лин" (белая гора).
Майолика	вид керамики из местных легкоплавких глин с добавлением в качестве <i>отошающих</i> песка или <i>шамота</i> . Отличается широкой палитрой декорирующих изделие легкоплавких <i>глазурей, глухих</i> или прозрачных, сохраняющих цвет керамики. При использовании в качестве пластичных материалов огнеупорных беложгущихся глин и каолинов <i>майолика</i> приближается по свойствам и технологии к <i>фаянсу</i> , однако отличается большей пористостью и меньшей температурой <i>политого обжига</i> .
Плавни	вещества, имеющие низкую температуру плавления или

	образующие в процессе обжига с другими компонентами сырья легкоплавкие соединения. <i>Плавни</i> используются в керамической технологии для снижения температуры спекания керамического материала и увеличения количества стеклофазы.
Пластичность	свойство массы изменять свою форму под воздействием нагрузки и сохранять ее после снятия нагрузки.
Полусухое прессование	способ формования керамических изделий, заключающийся в прессовании керамического <i>пресс-порошка</i> с влажностью 4-10% в металлических формах с помощью <i>пресса</i> .
Пресс-порошок	порошок, состоящий из сырьевых материалов, имеющий влажность 4-8 %, определенный размер частиц и преимущественно округлую форму, предназначенный для изготовления керамических изделий методом <i>полусухого прессования</i> . Получают <i>пресс-порошок</i> с помощью грануляторов или <i>башенных распылительных сушилок</i> .
Усадка	уменьшение размеров изделия при сушке ( <i>воздушная усадка</i> ) и обжиге ( <i>огневая усадка</i> ). В неравномерности <i>усадки</i> различных частей изделия основная причина брака керамики.
Фарфор	вид керамики белого цвета с плотным раковистым изломом. Для изготовления <i>фарфора</i> используют огнеупорные беложгущиеся <i>глины</i> и <i>каолины</i> , кварц и <i>полевых шпатов</i> (соотношение <i>пластичных</i> и <i>отошающих</i> как 1:1). Различают <i>мягкий</i> и <i>твердый фарфор</i> . Отличается <i>белизной</i> и просвечиваемостью.
Фаянс	вид керамики, для изготовления которого используют огнеупорные беложгущиеся глины, кварц и различные добавки. В отличие от <i>фарфора</i> имеет непрозрачное пористое тело, температура <i>утильного обжига</i> превышает температуру <i>политого</i> . Имеет мелкопористый белый излом. Различают <i>мягкий</i> и <i>твердый фарфор</i> .
Фритта	сплавленные вместе компоненты <i>глазури</i> , часть из которых водорастворимы и не могут использоваться сразу для глазурного <i>шликера</i> .
Шамот	обожженная глина (более широко - порошок обожженного керамического материала). Применяется в качестве <i>отошающего</i> материала, в том числе и как основной компонент.
Шликер	водная суспензия, содержащая мелкодисперсные частицы керамической массы, неоседающие в течение длительного времени. Для придания <i>шликеру</i> устойчивости (поддержания частиц во взвешенном состоянии) используют химические добавки и непрерывное перемешивание.

### **1.6 Вопросы для самопроверки:**

1. Классификация керамических изделий?
2. Свойства, размеры и назначение рядового керамического кирпича?
3. Сырьевые материалы для производства керамических изделий?
4. Назначение выгорающих, отощающих добавок и плавней?
5. В чем сущность пластического способа формования?
6. Особенность шликерного производства?
7. Применение керамических материалов в строительстве?
8. Виды декоративных покрытий для керамических изделий?
9. В чем сходства и отличия керамизита и аглопорита?
10. Назовите влажность глиняной массы для каждого способа производства.

## РАЗДЕЛ 2. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

### Глоссарий

Новые понятия	Содержание
Металлы	поликристаллическое тело, состоящие из большего числа мелких кристаллов неправильной формы.
Чугун	железоуглеродный сплав с содержанием углерода от 2,14 до 6,67%
Сталь	железоуглеродный сплав с содержанием углерода до 2,14
Латунь	сплав меди с цинком
Бронза	сплав меди с оловом
Арматурная сталь	сталь, принимаемая для армирования железобетонных изделий

#### 2.1 Общие сведения

Металлы обладают комплексом ценных для строительной техники свойств – большой прочностью, пластичностью, свариваемостью, выносливостью; способностью упрочняться и улучшать другие свойства при термомеханических и химических воздействиях. Этим и обуславливается широкое применение в строительстве.

Чистые металлы обладают низкой прочностью и твердостью и не обеспечивают во многих случаях требуемых свойств, поэтому они применяются редко. Наиболее широко используются сплавы, получаемые в результате кристаллизации расплава, представляющего собой раствор нескольких металлов или металлов и неметаллов. Как чистые металлы, так и их сплавы подразделяются на черные и цветные.

Из применяемых в строительстве металлов к черным металлам относятся железо и его сплавы (сталь и чугун); к цветным металлам относятся медь, алюминий, магний, титан, цинк и сплавы на их основе (бронза, латунь, авиаль, дюралюмин и др.).

Сталь и чугун - сплавы железа и углерода - различаются содержанием углерода: сталь содержит до 2,14 % углерода, чугун - более 2,14 %, но не более 6,67 %.

Из-за высокого содержания углерода чугуны обладают низкой способностью к пластической деформации. Их высокие литейные свойства обусловлены наличием в структуре эвтектики.

Выплавляемые в доменных печах чугуны бывают передельными, специальными (ферросплавы) и литейными. Передельные и специальные чугуны используют для получения стали и литейного чугуна.

В зависимости от формы углерода чугун подразделяется на белый и серый.

Белый чугун содержит углерод в составе химического соединения  $Fe_3C$  (цементита) и имеет в изломе белый цвет. Из-за очень высокой твердости цементита он практически не поддается механической обработке и используется в основном для получения стали.

Серый чугун, содержащий углерод в свободном состоянии (в виде графита), употребляется для получения изделий путем литья.

Сталь, содержащая углерода значительно меньше, чем чугун, является более пластичной и вязкой и поддается ковке и штамповке. Прочность стали превышает прочность бетона на сжатие более чем в 10 раз; на изгиб и растяжение - в 100 - 200 раз. В то же время плотность стали ( $7\ 850\ \text{кг/м}^3$ ) только в 3 раза выше плотности бетона ( $2\ 500\ \text{кг/м}^3$ ), поэтому металлические конструкции при той же несущей способности значительно легче железобетонных. Металлические элементы в конструкциях соединяются на болтах, заклепках и сваркой.

Высокая теплопроводность металлов требует принятия мер по предотвращению перетоков теплоты по металлическим элементам.

Металлические конструкции неогнестойки, что связано с легкой деформируемостью горячего металла. Для его защиты применяются окраски и обмазки, вспенивающиеся при возникновении пожара. Это обеспечивает задержку времени достижения критической температуры.

Бетон, как и другие каменные материалы, слабо сопротивляется изгибу и растяжению, однако в сочетании с арматурой его механические свойства значительно улучшаются. Поэтому конструкции из бетона армируют. Для повышения сцепления применяют арматуру периодического профиля, а также сварные сетки и каркасы.

## 2.2 Классификация арматурных сталей

Для армирования железобетонных элементов конструкций должна применяться арматура, отвечающая требованиям соответствующих государственных стандартов.

Арматурную сталь разделяют на классы, в зависимости от механических свойств и технологии изготовления и обозначают следующими буквами: стержневая арматура - А, проволочная В и канаты К.

Стержневая арматурная сталь подразделяется на:

- горячекатаную - гладкую класса А-I;
- периодическую профиля классов А-II, А-III, А-IV, А-V, А-VI;
- термически и термомеханически упрочненную периодического профиля классов А<sub>T</sub>-III, А<sub>T</sub>-IV, А<sub>T</sub>-V, А<sub>T</sub>-VI.

В обозначении классов термически и термомеханически упрочненной стержневой арматуры повышенной стойкости к коррозионному растрескиванию под напряжением добавляется буква К (например А<sub>T</sub>-IVK); свариваемой и повышенной стойкостью к коррозионному растрескиванию под напряжением - буквой СК (например А<sub>T</sub>-VСК).



В обозначении горячекатаной стержневой арматуры буква «в» употребляется для арматуры упрочненной вытяжкой (например, А<sub>Т</sub>-III<sub>В</sub>).

Основные виды арматурных сталей представлены в таблице 2.1.

В обозначении низкотемпературных сталей первое число обозначает содержание углерода в сотых долях процента. Цифры после буквы обозначают содержание элемента в процентах, если ничего нет - меньше одного процента. Буквы обозначают наличие элементов: Г - марганец, С - кремний, Х - хром, Т - титан, А - азот, Ю - алюминий, Р - бор, Ц - цирконий.

Таблица 2.1 – Основные типы арматурных сталей

Вид арматуры	Класс арматуры	Марка стали	Диаметр, мм
1	2	3	4
Стержневая горячекатаная гладкая	А-I	Ст3сп3	6-40
		Ст3пс3	6-40
		Ст3кп3	6-40
		ВСт3пс2	6-40
		ВСт3сп2	6-40
		ВСт3кп2	6-40
		ВСт3Гпс3	6-18
Стержневая горячекатаная периодического профиля	А-II	ВСт5сп2	10-40
		ВСт5пс2	10-16
		ВСт5пс2	18-40
		18Г2С	•Ю-1К
	А-III	10ГТ	10-32
		35ГС	6-40
		25Г2С	6-40
	А-VI	80С	10-18
20ХГ2П		10-22	
А-V	23Х2Г2Т	10-22	
Стержневая термически упрочненная периодического профиля	АТ-IV	-	10-25
	АТ-V	-	10-25
	АТ-VI	-	10-25
Обыкновенная арматурная проволока гладкая	В-I	-	3-5
Обыкновенная арматурная проволока периодического профиля	Вр-I	-	3-5
Высокопрочная арматурная проволока гладкая	В-II	-	3-8
Высокопрочная арматурная проволока периодического профиля	Вр-II	-	3-8
Арматурные канаты	К-7	-	4,5-15

Характерные профили стержневой арматуры представлены на рисунках 2.1-2.3.



Рисунок 2.1 - Профили стержневой арматуры

Маркировка стержней арматурной стали осуществляется прокатными маркированными знаками в соответствии с ТУ 14-2-949. Маркировку осуществляют также покраской концов стержней краской различного цвета в соответствии с ГОСТ 5781 и ГОСТ 10884.

Таблица 2.2 – Характеристика арматурной стали

Класс арматурной стали	Предел текучести физический или условный	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, %	
А-I (А240)	235	375	25	-	180°, C=1d
А-II (А300)	295	490	19	-	180°, C=3d
Ас-III (Ас300)	295	440	25	-	180°, C=1d
А-III (А400)	390	590	14	-	90°, C=3d
Ат-III (Ат400)	400	500	16	-	90°, C=3d
А500С	500	600	14	-	90°, C=3d
АIV (А600)	590	885	6	2	45°, C=5d

АТІУ (АТ600)	600	800	12	4	-, -
АТІУС (АТ600С)	600	800	12	4	-, -
АТУК (АТ600К)	600	800	12	4	-, -
А-У (А800)	785	1030	7	2	-, -
АТ-У (А800)	800	100	8	2	-, -
АТ-УК (А800К)	800	100	8	2	-, -
АУІ (А1000)	980	1230	6	2	-, -
АТ-УІ (АТ1000)	1000	1250	7	2	-, -
АТ-УІК (АТ1000К)	1000	1250	7	2	-, -
АТ-УІІ (АТ1200)	1200	1450	6	2	-, -

С увеличением класса арматуры повышается ее прочность при растяжении и резко снижается относительная деформация. Арматурные стали разных классов с одинаковым рисунком периодического профиля различают по цвету окрашенных концов стержней. Маркировка покраски представлена в таблице 2.3.

Холоднотянутая проволочная арматурная сталь подразделяется на арматурную проволоку гладкую класса В-I; периодического профиля класса Вр-I; высокопрочную гладкую класса В-II; периодического профиля класса Вр-II.

Разновидности проволочной арматуры показаны на рисунках 2.4 – 2.7.

Таблица 2.3 – Маркировка покраской и прокатная маркировка класса прочности стержневой арматурной стали

Класс арматуры	Цвет покраски концов	Число поперечных ребер между
А-III	-	3
АТ-III	белый	3
А500С	белый и синий	1
А-IV	красный	4
АТ-IV	желтый	4
АТ-IVС	желтый и белый	4

Класс арматуры	Цвет покраски концов	Число поперечных ребер между
A <sub>T</sub> -IVK	желтый и красный	4
A-V	красный и зеленый	5
A <sub>T</sub> -V	зеленый	5
A <sub>T</sub> -VK	зеленый и красный	5
A-VI	красный и синий	6
A <sub>T</sub> -VI	синий	6
A <sub>T</sub> -VIK	синий и красный	6
A <sub>T</sub> -VII	черный	7

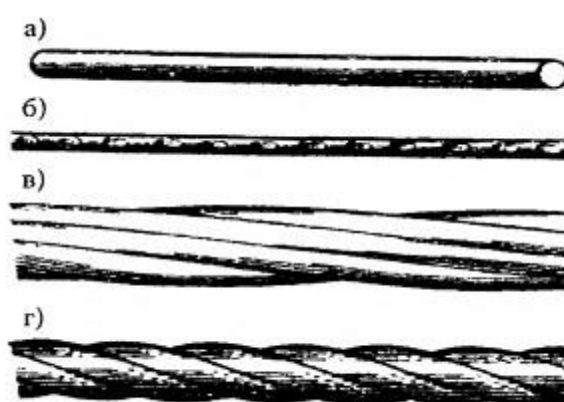


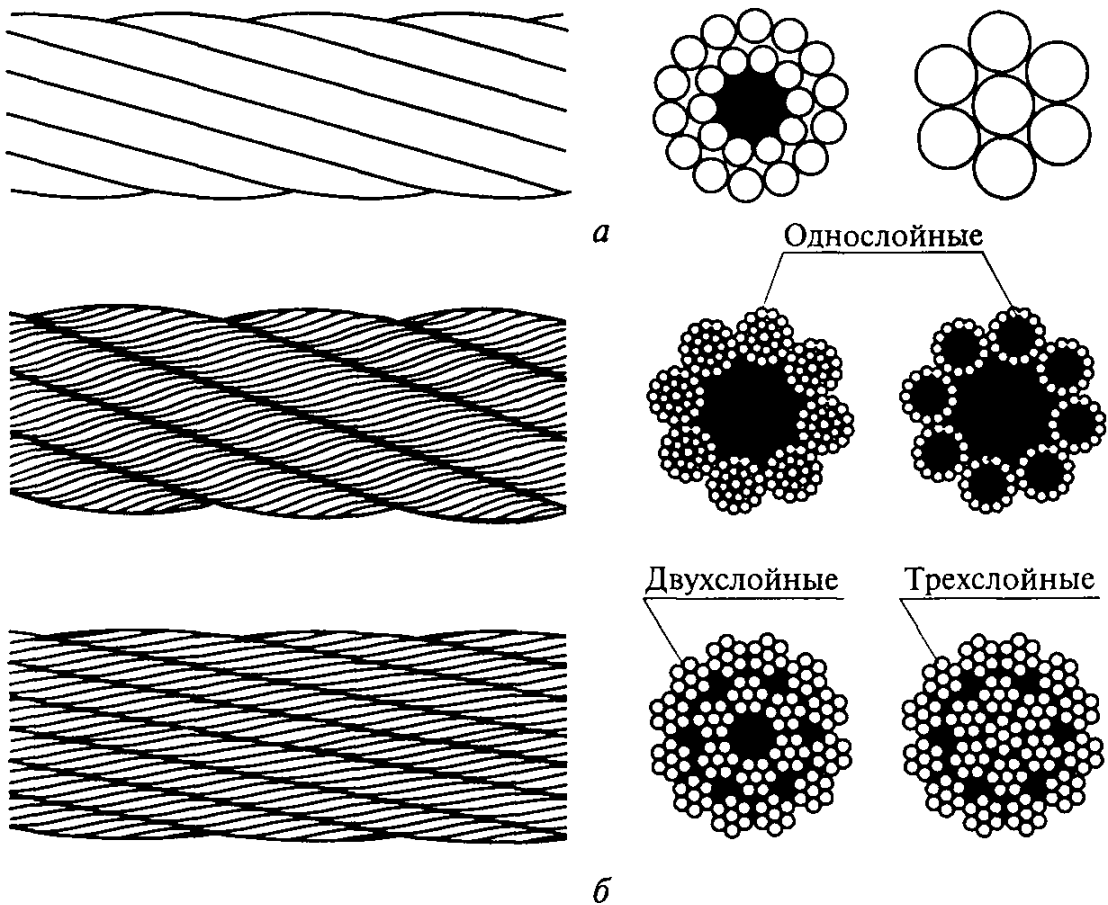
Рисунок 2.2 – Разновидности проволочной арматуры: а - арматурная проволока классов В-I и В-II; б - то же, класса Вр-II, в - витая проволочная арматура класса П-7 (арматурная прядь); г - то же, класса К2Х7 (арматурный канат)

Арматурные канаты (рисунок 2.3) изготавливают из высокопрочной холодноотянутой проволоки. Для лучшего использования прочностных свойств проволоки в канате шаг свивки принимают максимальным, обеспечивающим нераскручиваемость канатов, обычно в пределах 10 – 16 диаметров каната.



Рисунок 2.3 – Арматурный канат

Поперечное сечение арматурных канатов представлено на рисунке 2.4, строение каната – рисунок 2.5.





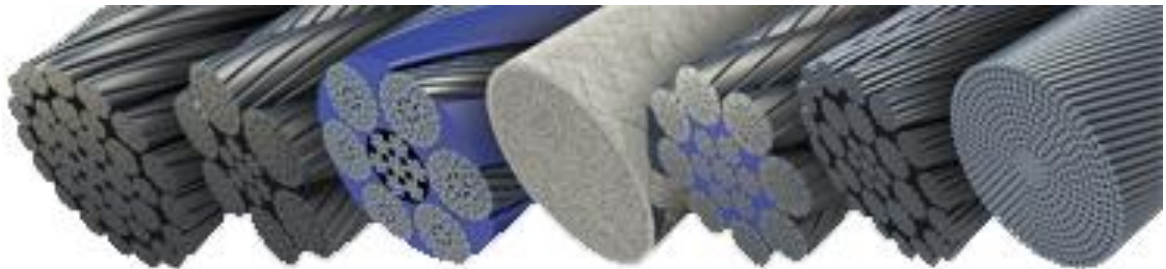
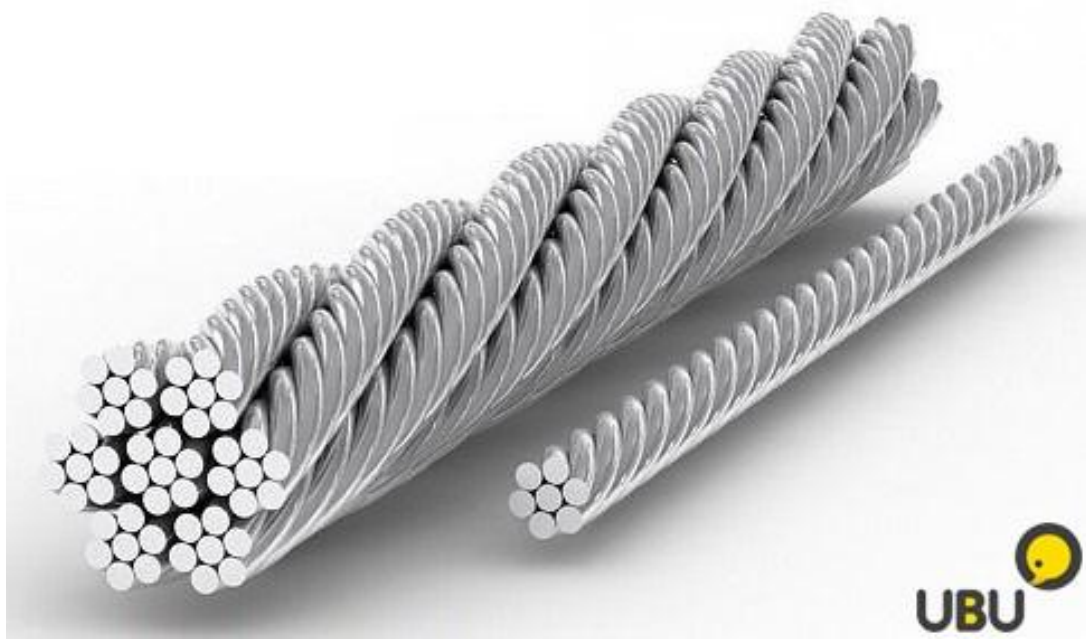


Рисунок 2.4 – Поперечное сечение канатов

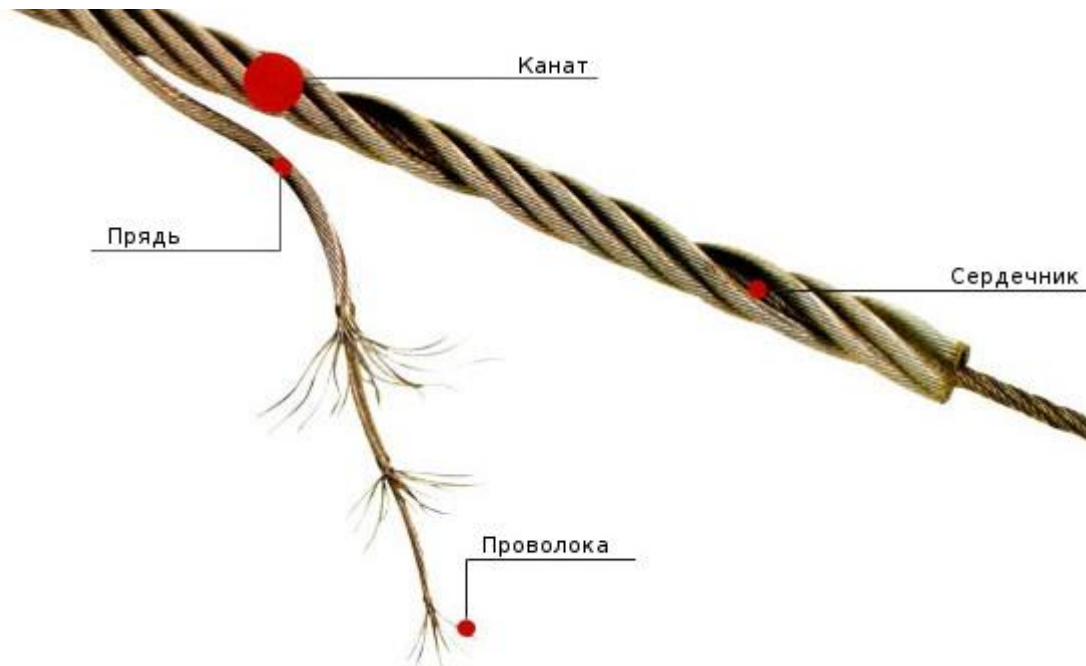


Рисунок 2.5 – Строение каната



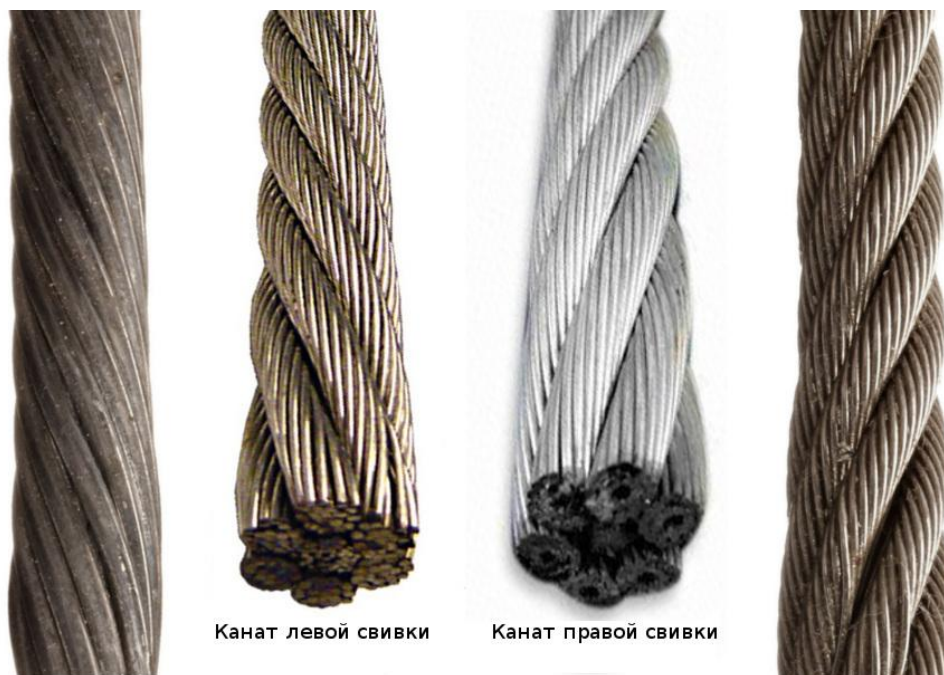


Рисунок 2.6 – Разновидность свивки каната

В условном обозначении арматурных канатов, кроме буквы К, указывается число проволок в канате (К7, К19).

Для закладных деталей и соединительных накладок применяют прокатную углеродистую сталь. При изготовлении арматурных сеток и каркасов, а также сварки отдельных стержней следует преимущественно применять контактную точечную и стыковую сварку. При изготовлении закладных деталей – автоматическую сварку под флюсом, контактную рельефную сварку.

Выбор арматурной стали следует производить в зависимости от типа конструкции, наличия предварительного натяжения, а так же от условий эксплуатации.

В качестве ненапрягаемой арматуры железобетонных конструкций следует преимущественно применять:

а) стержневую арматуру класса А-III;

б) арматурную проволоку диаметром 3-5 мм класса Вр-I (в сварных сетках и каркасах).

Допускается применять:

в) стержневую арматуру класса А-II и А-I для продольной и поперечной арматуры;

г) термомеханически упрочненную стержневую арматуру класса А<sub>Т</sub>-IVС для продольной арматуры сварных каркасов и сеток;

д) стержневую арматуру классов А-V, А-VI, а также горячекатаную класса А-IV только для продольной арматуры связанных каркасов и сеток.

Ненапрягаемую арматуру класса А-III, Вр-I, А-I и А-II рекомендуется применять в виде сварных каркасов и сеток.

В качестве напрягаемой арматуры предварительно напряженных железобетонных элементов следует преимущественно применять:

а) термически и термомеханически упрочненную арматуру класса А<sub>T</sub>-VI и А<sub>T</sub>-V.

Допускается применять:

б) арматурную проволоку классов В-II, Вр-II и арматурные канаты классов К7 и К19.

Для монтажных подъемных элементов сборных железобетонных и бетонных конструкций должна применяться горячекатаная арматурная сталь класса Ас-II, марки 10ГТ и класса А-I марок ВСтЗсп2 и ВСтЗпс2.

### 2.3 Защита металлов от коррозии

Коррозией называют постепенное, начинающееся с поверхности разрушение металла от воздействия окружающей среды. (Сущность коррозии заключается в том, что металлы, применяемые в строительстве, чаще всего встречаются в природе в виде устойчивых соединений с кислородом Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с серой CuS; CuFeS<sub>2</sub>. При получении чистого металла эти соединения искусственным путем разрушают. Коррозия металлов в большинстве случаев представляет собой восстановление этих связей. Чаще всего образующиеся при коррозии соединения Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CuS имеют неплотную структуру, плохо связаны с металлом. В таких случаях коррозия металла вызывает снижение прочности и даже разрушение металлических конструкций.

Коррозия металла начинает развиваться с его поверхности, если по всей поверхности, то она называется равномерной (рисунок 2.7 - 1), если поражает отдельные участки - пятнами (рисунок 2.7 - 2). Коррозию, протекающую по границам зёрен металла, называют межкристаллитной или интеркристаллитной (рисунок 2.7 - 3). Начало коррозии сопровождается потерей поверхностью металла блеска. По мере ее протекания уменьшается сечение детали или конструктивного элемента.

Практически все стальные конструкции нуждаются в защите. Однако СНиП 2.03.11-85\* допускает применение для несущих конструкций стали марок 10ХСНГ1, 15ХСНД и 10ХСНД при слабоагрессивном воздействии среды без защитных покрытий с соблюдением определённых требований по составу среды.

Повышенное содержание меди (до 0,2 %) и углерода заметно повышает коррозионную стойкость, а при наличии добавок фосфора, хрома и никеля это повышение ещё более существенно.

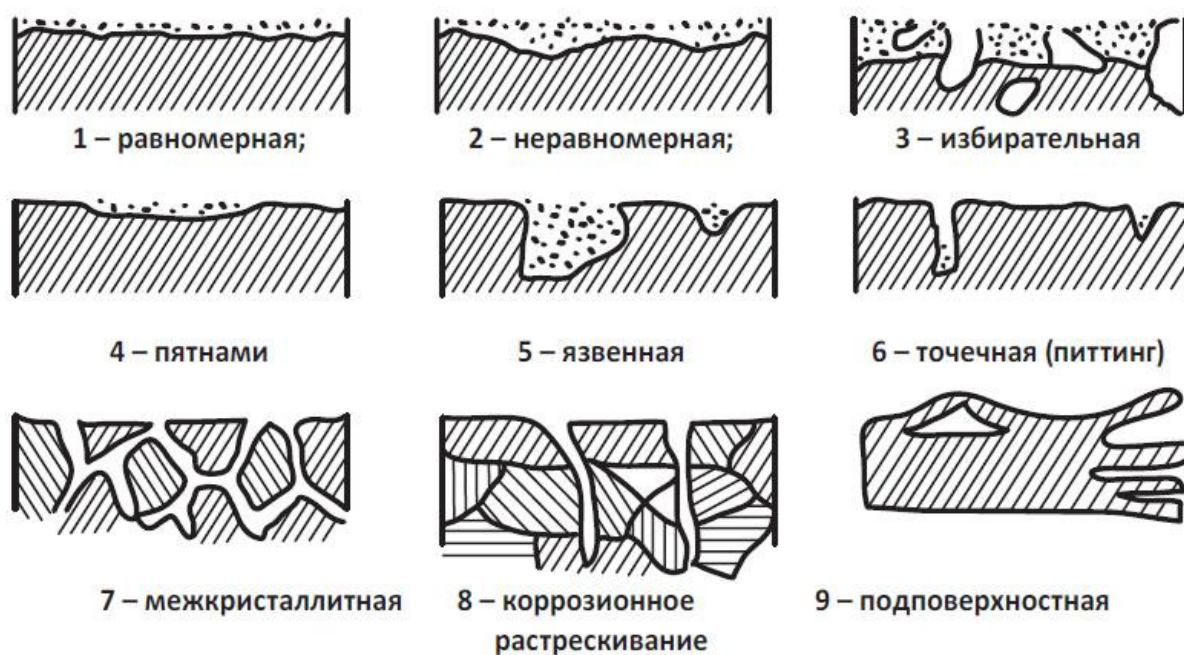


Рисунок 2.7 – Виды коррозии

Такие стали помимо коррозионной стойкости, обладают повышенной надежностью эксплуатации при низких температурах и ударных нагрузках.

Запрещено использование безникелевых марок сталей 09Г2 и 14Г2 для средне- и сильноагрессивных сред, а также слабоагрессивных при наличии в атмосфере сернистого ангидрида или сероводорода. Эти запрещения распространяются и на безникелевые стали марок 12Г2СМФ, 14СМФР даже при слабоагрессивных средах при наличии сернистого ангидрида, сероводорода или хлористого водорода (ГОСТ 9.903-81 и ГОСТ 2694-84).

Не допускается проектирование несущих конструкций отапливаемых зданий, включающих профилированные стальные листы для среднеагрессивных сред, а также проектирование зданий с панелями, включающими профилированные листы, при сильноагрессивных средах.

Также не допускается применение оцинкованной стали или металлических защитных покрытий для зданий и сооружений, на которые воздействуют жидкие среды или грунты с рН до 3 (кислые) и свыше 11 (щелочные), различные растворы солей тяжелых металлов, щёлочи, кальцинированная соль, если без присутствия их среда относится к среднеагрессивной или сильноагрессивной.

Лакокрасочные материалы, применяемые для защиты стальных конструкций (грунтовки, краски, эмали, лаки), подразделяются на четыре группы (по характеру плёнообразующего вещества):

- I - пентафталевые, глифталевые, масляные, масляно-битумные;
- II - фенолформальдегидные, хлоркаучуковые;
- III - эпоксидные, кремнийорганические, перхлорвиниловые;

IV - перхлорвиниловые, на сополимерах винилхлорида, эпоксидные.

Относительно конструкций из алюминиевых сплавов нормы также вводят конкретные и жесткие ограничения, особенно при эксплуатации в средне- и сильноагрессивных средах. Не допускается выполнение конструкций из алюминия при наличии в атмосфере хлора, хлористого водорода и фтористого водорода по группам газов С и Д. Сплавы алюминия марок 1915, 1925, 1915Т запрещено применять в конструкциях, подверженных воздействию неорганических жидких сред [1, 3].

Для конструкций, расположенных в грунтах, применяются изоляционные покрытия. Элементы круглого и прямоугольного сечения, канаты, тросы, трубы защищаются покрытиями из липких полимерных лент или битумно-резиновыми покрытиями в соответствии с ГОСТ 9.015-74 (толщиной не менее 3 мм). Монтажные сварные швы защищаются после сварки. Битумные грунтовки допускаются в один слой.

Грунтовочные составы, наносимые непосредственно на защищаемую поверхность, улучшают адгезию и антикоррозионные свойства покрытия и выбираются в зависимости от материала защищаемой поверхности и вида покрытия. Покрывные составы (2-7 слоев) - это многокомпонентные составы из плёнкообразователя, растворителя и пигментов. Дополнительно входят наполнители и отвердители.

Пигменты - это окислы или сами металлы (охра, железный сурик, цинковые белила, металлические порошки, алюминиевая пудра, цинковая пыль, сажа, графит, а также органические вещества для цвета).

Наполнители (мел, каолин, тальк и др.) добавляются для удешевления лакокрасочного материала и некоторого улучшения его защитных свойств. Шпатлёвочные составы используются для выравнивания окрашиваемой поверхности и улучшения внешнего вида. Также как и грунтовки, они представляют собой пигментированные лаки или олифы. Покрытие в большинстве случаев состоит из грунтовки (1-2 слоя) и покрывных слоев.

## **2.5 Контрольные вопросы:**

1. Определение металлов?
2. Что такое сталь?
3. Содержание углерода в чугуне?
4. Виды коррозии?
5. Методы защиты металлов от коррозии?
6. Разновидность стальной арматуры?
7. Характеристика и виды канатов?
8. Маркировка сталей?
9. Цвета покраски арматурных стержней?
10. Назначение арматуры в железобетоне?

## РАЗДЕЛ 3. ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

### 3.1 Общие сведения

*Вяжущие вещества* – важнейшая разновидность строительных материалов. Уровень технического развития и состояния производства вяжущих веществ определяют промышленный потенциал страны, масштабы и качество строительства.

*Вяжущие вещества* – основообразующая составляющая бетонных смесей, от которой зависят реологические свойства формовочных масс, темпы твердения, физико-механические и структурные характеристики бетона, долговечность железобетонных изделий.

*Вяжущие вещества* – многочисленный ряд материалов различного происхождения и свойств.

Вяжущие вещества предназначены для решения двух основных задач:

- синтез искусственного технического камня, обладающего определенным комплексом свойств;
- сочленение в единое целое различных элементов, а также объединение строительных деталей в сооружение.

Все многообразие вяжущих веществ в зависимости от их происхождения (природы) делят на следующие группы:

- *неорганические* (минеральные), например, гипсовые и магнезиальные вяжущие, различные виды цементов;
- *органические* – битумные и дегтевые;
- *полимерные* (разновидность органических вяжущих) – различные виды полимеризационных (термопласты) и поликонденсационных (реактопласты);
- *комплексные: смешанные* (тщательно перемешанные две или несколько разновидностей неорганических вяжущих с добавками или без них), *компаундированные* (сплавы или механические смеси нескольких органических материалов), *комбинированные* (сочетание неорганического вяжущего с органическими или полимерными).

В данном учебном пособии рассмотрены неорганические (минеральные) вяжущие вещества, составляющие основу бетона и железобетона.

Минеральные вяжущие вещества – *порошкообразные* материалы, которые при смешивании (затворении) с водой (или другой жидкостью) образуют *пластичную* массу (тесто), со временем самопроизвольно затвердевающую в *камневидное* тело.

В зависимости от условий твердения и отношения к воздействию окружающей среды минеральные вяжущие вещества подразделяют на воздушные, гидравлические, кислотоупорные и автоклавного твердения.

*Воздушные* вяжущие вещества – после затворения водой твердеют, набирают и длительно сохраняют прочность только на воздухе. При длительном воздействии воды они снижают прочность и разрушаются. Такие



материалы можно применять лишь в условиях ограниченной влажности, в сооружениях, не подвергающихся воздействию воды. К воздушным вяжущим относят известь воздушную, гипсовые и магнезиальные вяжущие, растворимое стекло.

*Гидравлические* вяжущие вещества – после затворения водой и предварительного затвердевания в воздушной среде способны продолжать твердение и наращивать прочность в воде. Гидравлические вяжущие: известь гидравлическую, цементы, смешанные вяжущие.

### 3.2 Типичные стадии технологии получения минеральных вяжущих веществ

В технологии различных вяжущих можно выделить следующие *стадии*, типичные для производства этой группы строительных материалов (рисунок 3.1).

*Добыча сырья.* Основу сырьевой базы образуют горные породы осадочного происхождения (известняк, гипс, глина). Широко используются также техногенные материалы (отходы металлургического производства, тепловой энергетики, добычи и обогащения руд, химической промышленности).

*Измельчение и классификация сырья.* Измельчение сырья необходимо для получения частиц заданных размеров, которые должны соответствовать условиям обжига. В зависимости от технологии вяжущих измельчение осуществляют путем дробления (производство извести, гипсовых и магнезиальных вяжущих) или путем дробления и помола (производство гипсовых вяжущих, цементов).



Рисунок 3.1 – Технология производства портландцемента



В ряде производств вяжущих используют однокомпонентный сырьевой материал, зачастую горные породы (например, для получения извести, гипсовых и магнезиальных вяжущих). Для производства цементов в качестве сырья используют многокомпонентную искусственную смесь с заданным химическим составом. В последнем случае осуществляют расчет состава сырьевой смеси.

Классификация (фракционирование) обеспечивает однородность зернового состава сырьевых материалов.

*Термическая обработка (обжиг) сырья.* В процессе обжига происходят изменения химического состава и структуры исходных материалов. Температура обжига должна обеспечить образование *новых соединений* заданного состава, способных самопроизвольно, *активно взаимодействовать* с водой.

*Помол обожженного материала.* Продукт обжига, как правило, измельчают в тонкий порошок совместно с добавками или без них. Тонкий помол способствует активному взаимодействию вяжущего вещества с водой.

### 3.3 Основные характеристики вяжущих веществ

Применение вяжущего вещества предполагает последовательное изменение его состояния по схеме: порошок → тесто → камень. Каждую ипостась вяжущего характеризуют конкретными свойствами, показатели которых меняются в зависимости от вида вяжущего.

Порошкообразное состояние вяжущего оценивают *тонкостью помола* – характеристика размеров зерен. Тонкость помола выражают следующими показателями: остатком (%) на ситах со стандартными размерами ячеек; удельность поверхностью ( $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $\text{см}^2/\text{г}$ ), зерновым составом (%). Для характеристики тонкости помола вяжущих используют, как правило, сита с размером ячеек  $0,2 \text{ мм} = 200 \text{ мкм}$  (№ 02) и  $0,08 \text{ мм} = 80 \text{ мкм}$  (№ 008).

*Удельная поверхность* – суммарная площадь поверхности всех частиц в единице массы порошка. Например, удельная поверхность цемента  $300 - 350 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Различают: *внешнюю удельную поверхность* – суммарная площадь всех зерен в единице массы; *полную удельную поверхность* – сумма внешней поверхности зерен и поверхности пор и капилляров частиц. На удельную поверхность влияют размеры, форма и микроструктура частиц вяжущего.

Для получения теста вяжущего необходимо определенное количество затворителя – воды. *Водопотребность* – количество воды, необходимое для получения теста заданной пластичности (подвижности). Водопотребность зависит, главным образом, от тонкости помола и состава вяжущего.

*Нормальная густота теста вяжущего* – консистенция с регламентированной подвижностью, которую определяют по специальным стандартным методикам с учетом особенностей вяжущего.

*Нормальная густота вяжущего* – минимальное количество воды (% массы вяжущего), необходимое для получения теста стандартной (определенной) консистенции.

Пластичное тесто вяжущего со временем самопроизвольно превращается в камневидное тело. *Сроки схватывания* – период времени от момента затворения вяжущего до полной потери пластичности. Различают начало и конец схватывания. *Начало схватывания* – время от момента затворения до момента *начала загустевания*, потери пластичности. *Конец схватывания* – время от момента затворения до момента *полного загустевания*, когда тесто превращается в твердое тело, не обладающее еще значительной прочностью. Скорость схватывания – важное свойство вяжущих, определяющее жизнеспособность бетонных и других формовочных смесей. Сроки схватывания изменяются в широких пределах от десятков минут до нескольких часов. Схватывание теста зависит от состава и тонкости помола вяжущего, количества воды, добавок.

Основной характеристикой камня вяжущего является *прочность*. Для большинства вяжущих веществ по показателям прочности определяют марку. Другими важными свойствами камня вяжущего являются пористость, водопоглощение, водостойкость, водонепроницаемость, коррозионная стойкость, морозостойкость, объемные деформации, истираемость.

Водостойкость вяжущих оценивают по *коэффициенту размягчения* ( $K_p$ ), который представляет отношение прочности образцов в водонасыщенном состоянии к прочности образцов, высушенных до постоянной массы. Водостойкими являются материалы с  $K_p > 0,8$ .

### 3.4 Роль воды в вяжущих системах

*Вода* в вяжущих системах (тесто вяжущего, бетонная смесь) выполняет две важные *функции*:

- обеспечение заданной подвижности массы;
- участие в процессах гидратации – взаимодействия веществ с водой с образованием гидратов - новых соединений, формирующих камень вяжущего.

Поверхность частиц вяжущего, взаимодействуя с водой, обладает *некомпенсированными молекулярными силами*. За счет действия указанных сил молекулы воды ориентируются и уплотняются. В адсорбированных пленках вода становится неподвижной, приобретая свойства твердого тела (упругость, прочность, пониженную температуру замерзания, повышенную плотность). По мере удаления от твердой поверхности воздействие молекулярных сил на воду уменьшается.

Водные оболочки, образующиеся на поверхности мельчайших частиц вяжущего, выполняют *двойную функцию*:

- придают вяжущей суспензии связность и устойчивость;
- обладают «смазочными» свойствами, облегчая скольжение твердых частиц одна по другой.

Расход воды для приготовления теста вяжущего должен быть *оптимальным*, соответствующим его водопотребности: обеспечивать образование водных оболочек определенной толщины вокруг частиц (рисунок 3.2).

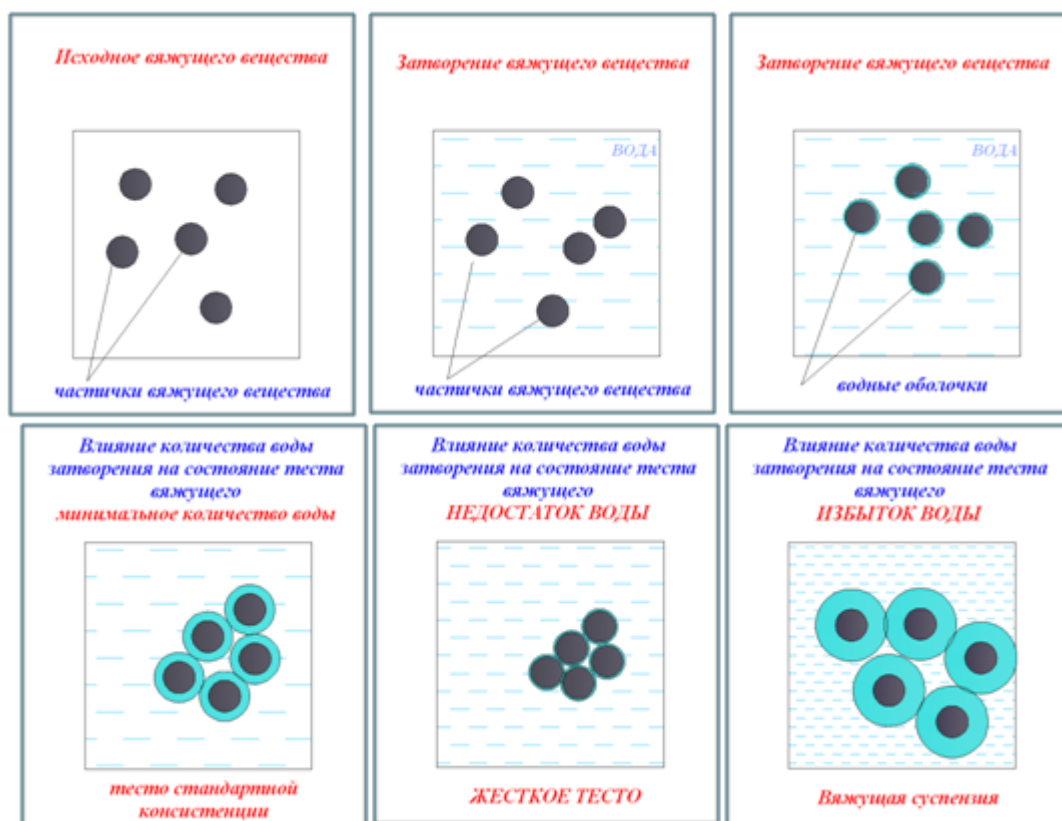


Рисунок 3.2 – Влияние количества воды на состояние теста вяжущего

При *недостатке* воды затворения получается плохо перемешиваемая масса, так как велики силы трения между твердыми частицами, а «смазочные» свойства тонких оболочек не выразительны. Такая масса трудно формуется, после затвердевания имеет невысокую прочность по причинам: ограниченное количество воды, неуплотненная структура.

При *избытке* воды вяжущая суспензия теряет устойчивость, происходит водоотделение (прослойки воды между твердыми частицами имеют значительные размеры, это исключает воздействие молекулярных сил на большую часть объема воды). Такая масса после затвердевания характеризуется неоднородностью, невысокой прочностью из-за рыхлой структуры.

Водопотребность вяжущих (связана с первой функцией воды) превосходит количество воды, химически связываемое вяжущим (обусловлено второй функцией воды). Поэтому в затвердевшем вяжущем имеется значительный избыток *химически не связанной воды*, которая создает в камне систему пор и капилляров. Повышение пористости вызывает снижение прочности, морозостойкости материала. Уменьшение

водопотребности вяжущих может быть достигнуто за счет введения добавок пластифицирующего действия.

### 3.5 Твердение вяжущих веществ

Твердение вяжущих веществ – сложный физико-химический процесс, продолжающийся длительное время (например, для цемента исчисляется годами).

*Твердение* – превращение теста вяжущего в камень и дальнейшее упрочнение последнего.

Твердение обусловлено гидратацией вяжущего, кристаллизацией гидратов, формированием кристаллического сростка. Твердение достигается за счет скрепления отдельных гидратов в единую структуру камня.

Основные стадии гидратационного твердения вяжущих (рисунок 3.3):

1) *Растворение* исходного вяжущего вещества ( $ВВ_{тв}$ ) в воде с образованием его насыщенного раствора ( $ВВ_{пр}$ ):



Поскольку вяжущие мало растворимы в воде, то раствор быстро становится насыщенным, и большая часть вяжущего остается нерастворенной.

2) *Химическое взаимодействие* вяжущего вещества с водой, в результате которого образуются гидратные соединения ( $ГВВ_{пр}$ ):



Гидратные новообразования – продукты гидратации и гидролиза вяжущих веществ. Существуют две точки зрения на механизмы этих процессов.

Согласно *кристаллизационной* теории Ле Шателье (первая точка зрения), реакции гидратации протекают в растворе: с водой взаимодействует растворенная часть вяжущего ( $ВВ_{пр}$ ), и в растворе же образуются гидраты ( $ГВВ_{пр}$ ). Растворимость в воде гидратных новообразований ниже, чем исходных вяжущих веществ.

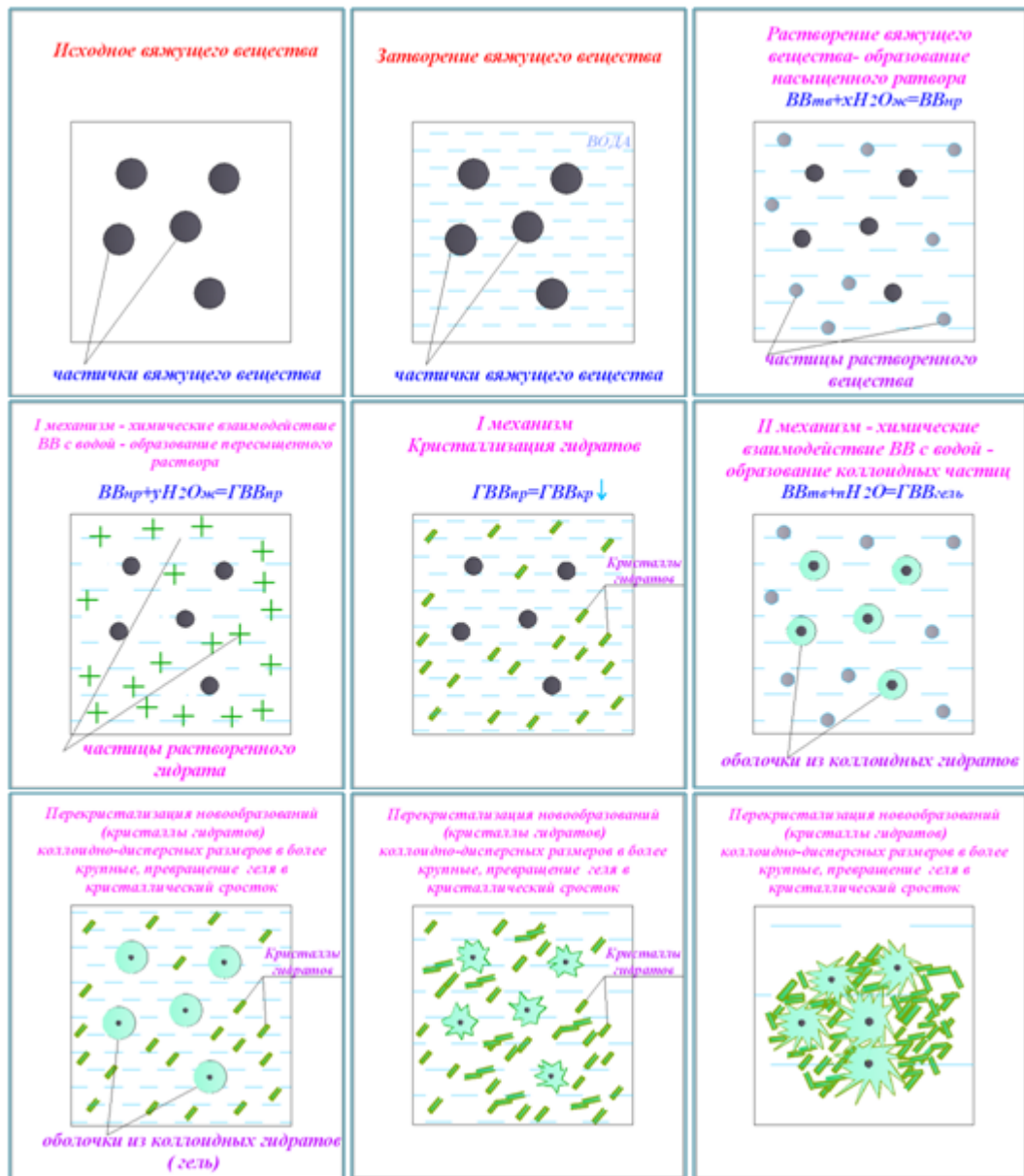


Рисунок 3.3 – Стадии твердения вяжущих веществ

Поэтому раствор, *насыщенный* по отношению к вяжущему, будет *пересыщенным* относительно гидратов. В последующем гидратные соединения выделяются в виде *кристаллов* ( $ГВВ_{кр}$ ) из пересыщенного раствора:



Согласно *коллоидной* теории Михаэлиса и Байкова (вторая точка зрения), первоначально процесс идет по схеме Ле Шателье, но выделяющиеся из пересыщенного раствора кристаллы гидратов не играют существенной роли в процессе твердения.

Гидраты образуются в результате непосредственного (прямого) взаимодействия еще нерастворившихся твердых зерен вяжущего вещества с

водой: реакции гидратации и гидролиза протекают гетерогенно. Наряду с реакцией (3.1), происходит взаимодействие:



Пересыщенный раствор характеризуется неустойчивым (метастабильным) состоянием, в растворе возникают условия для кристаллизации избытка гидратов, т.е. для перехода данной системы в более устойчивое состояние – реакция (3.3).

Поскольку раствор пересыщен, то скорость кристаллизации велика. Это приводит к образованию мельчайших кристаллов, размер которых близок к размерам *коллоидных* частиц ( $10^{-9} - 10^{-7}$  см). Реакция протекает в растворе, уже пересыщенном гидратами. Поэтому гидратные новообразования не растворяются, а сразу выделяются в *коллоидно-дисперсном* состоянии и образуют гелевую массу. Следовательно, одновременно с реакциями (3.4), (3.3) происходит процесс:



Гелевидная масса обладает коагуляционной структурой. В дальнейшем процесс гидратации распространяется на более глубоко расположенные слои зерен вяжущего: происходит отсасывание воды из гелевидной массы вглубь частиц. Это приводит к увеличению слоя гелевидной массы на поверхности зерен и к уплотнению массы (вследствие «внутреннего отсасывания» воды). На этой стадии коагуляционная структура переходит в условно-коагуляционную, что сопровождается потерей пластичности – начало схватывания, затем твердение (рисунок 3.5).

При гидратационном твердении вяжущих выделяют следующие *три типа* структур (П.А. Ребиндер): коагуляционные, условно-коагуляционные, кристаллизационные (рисунок 3.4).

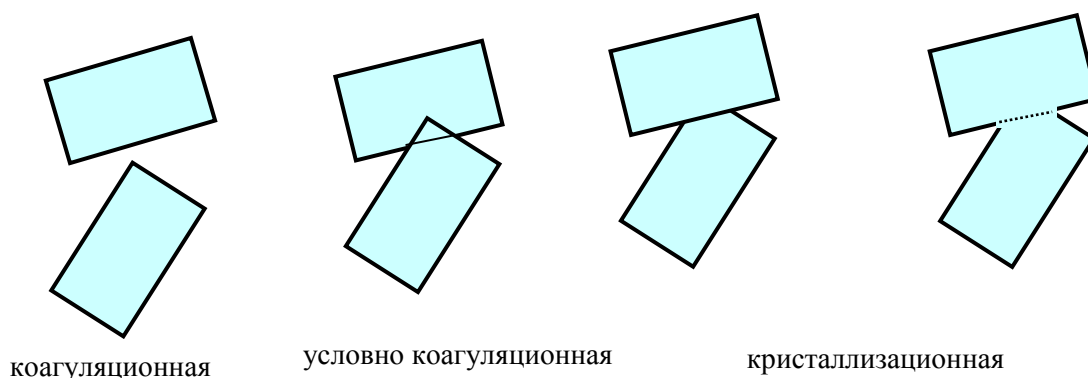


Рисунок 3.4 – Типы структур твердения вяжущих веществ

3) На третьей стадии (кристаллизация) происходит *перекристаллизация* новообразований коллоидно-дисперсных размеров в более крупные, при этом гель превращается в кристаллический сrostок. Процессы



перекристаллизации обусловлены тем, что растворимость мельчайших кристаллов значительно выше, чем крупных. Поэтому происходит растворение коллоидно-дисперсных новообразований, что способствует пересыщению раствора. Из пересыщенного раствора выпадают новые кристаллы, осаждающиеся на поверхности ранее образованных более крупных. Таким образом, кристаллы укрупняются, гель переходит в кристаллическое состояние, что сопровождается твердением системы.

### 3.6 Классификация цементов

*Цементы* – группа гидравлических вяжущих веществ, состоящих, как правило, из клинкера и добавок.

Основные виды цементов, отличающиеся по составу:

- портландцемент (ПЦ);
- разновидности портландцемента (ПЦ с минеральной добавкой, быстротвердеющий, сульфатостойкий, пластифицированный, гидрофобный, белый и цветные, ПЦ для асбестоцементных изделий и др.);
- шлаковые цементы: шлакопортландцемент, а также известково – шлаковые, сульфатно – шлаковые, шлакощелочные вяжущие;
- пуццолановые цементы: пуццолановый портландцемент, а также известково-пуццолановые, гипсоцементно-пуццолановые вяжущие;
- глиноземистый цемент;
- разновидности глиноземистого цемента: высокоглиноземистый, ангидритоглиноземистый, сульфоалюминатный;
- цементы со специальными свойствами: кислотоупорный кварцевый цемент, цементы с полимерными добавками.

Для классификации цементов используют признаки: особенности схватывания, твердения, показатели прочности.

В зависимости от времени *начала схватывания* различают виды цементов:

- *медленносхватывающиеся* (не ранее 1 ч 30 мин);
- *нормальносхватывающиеся* (45 мин – 1 ч 30 мин);
- *быстросхватывающиеся* (не позднее 45 мин).

По *скорости твердения* различают следующие цементы:

- *обычные* (с нормированной прочностью в возрасте 28 сут);
- *быстротвердеющие* (прочность нормируют в возрасте 3 и 28 сут);
- *особо быстротвердеющие* (с нормированной прочностью 1 сут и менее).

По *величине прочности* (по марке):

- *высокопрочные* – М550, М600 и выше;
- *повышенной прочности* – М500;
- *рядовые* – М400;
- *низкомарочные* – М300 и ниже.

### 3.7 Портландцемент

*Портландцемент* – гидравлическое вяжущее, полученное совместным тонким помолом портландцементного клинкера и двуводного гипса.

Марки портландцемента: М400, М500, М550, М600.

Двуводный гипс вводят для регулирования сроков схватывания в количестве 3 – 6% (в пересчете на содержание  $SO_3$  1,0 – 3,5%; в высокопрочных и быстротвердеющих – 1,5 – 4,0 %). Гипс отодвигает начало схватывания и способствует повышению ранней прочности цементного камня.

Наряду с обычным портландцементом (без добавок), выпускают *портландцемент с минеральной добавкой*. Содержание активной минеральной добавки может быть до 5%; 5 – 10% (добавки осадочного происхождения) или 5 – 20% (добавки вулканического происхождения, глиежи, гранулированные доменные и электротермофосфорные шлаки).

В зависимости от содержания активных минеральных добавок портландцемент обозначают: ПЦ Д0; ПЦ Д5; ПЦ Д20.

*Активные минеральные добавки (АМД)* – природные и искусственные вещества, которые не обладают вяжущими свойствами, но, будучи смешанными в тонкодисперсном состоянии с известью, при затворении водой образуют тесто, способное после твердения на воздухе продолжать твердеть и в воде.

Природные АМД – *осадочные* породы, содержащие активный кремнезем (диатомиты, трепелы, опоки) и *вулканические* породы, содержащие алюмосиликаты (пепел, туфы, пемза, трассы и другие).

Искусственные (*техногенные*) АМД – гранулированные доменные и электротермофосфорные шлаки, топливные шлаки; золы ТЭС и другие. Эти добавки иногда обладают слабыми вяжущими свойствами.

АМД вводят для снижения доли клинкера (снижения себестоимости цемента), для повышения водостойкости и антикоррозийных свойств цемента.

*Вещественный состав* портландцемента – соотношение содержания клинкера, гипса и активных минеральных добавок.

*Портландцементный клинкер* – продукт спекания сырьевой смеси заданного состава. Представляет собой гранулы черного цвета с размером 10– 60 мм. Портландцементный клинкер – полуфабрикат в производстве портландцемента.

Качество клинкера (а также цемента) зависит от его состава, для выражения последнего используют:

- содержание основных оксидов (химический состав);
- содержание основных соединений – фаз (фазовый состав);
- соотношения между оксидами в виде коэффициента насыщения, в виде кремнеземного и глиноземного модулей.

*Химический состав* портландцементного клинкера, %: СаО 64 – 67; SiO<sub>2</sub> 21 – 25; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4 – 8; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2 – 4. Кроме того, в составе клинкера могут

присутствовать  $MgO$  1 – 5 %;  $R_2O$ ,  $SO_3$ ,  $TiO_2$ ,  $MnO$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $P_2O_5$  и другие при суммарном содержании 1,5 – 3,0 %. В химическом составе преобладают  $SiO_2$  и  $CaO$ , образующие в клинкере силикаты кальция.

*Фазовый состав* портландцементного клинкера – важнейшая характеристика, по которой прогнозируют свойства цемента: скорость твердения, тепловыделение при твердении, стойкость к действию пресных и минерализованных вод, степень усадочных деформаций.

Фазовый состав портландцементного клинкера, %: алит 40 – 65; белит 15 – 35; алюминаты кальция (трехкальциевый алюминат) 4 – 12; алюмоферриты кальция 10 – 18. Кроме того, в клинкере могут присутствовать свободные, не вступившие в химическое взаимодействие  $CaO$  и  $MgO$ . Допустимое содержание  $CaO$  0,5 – 1 %,  $MgO$  (периклаз) 5 %; превышение указанных пределов может вызвать растрескивание и разрушение цементного камня.

*Алит* – твердый раствор, матрицей которого является трехкальциевый силикат  $3CaO \cdot SiO_2$  ( $C_3S$ ). При кристаллизации фазы из расплава  $C_3S$  захватывает в свою структуру  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  и другие (до 4%). Алит кристаллизуется в виде призматических и гексагональных кристаллов размером 40 – 60 мкм (рисунок 3.5).

Алит – основной носитель вяжущих свойств цемента, обуславливает достижение высокой прочности цементного камня в ранние сроки и определяет прочностные показатели в возрасте 28 сут (марка).

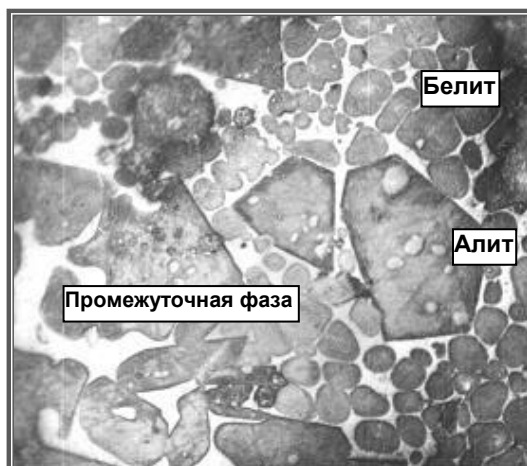


Рисунок 3.5 – Микроструктура портландцементного клинкера

*Белит* – твердый раствор, матрицей которого является двухкальциевый силикат  $2CaO \cdot SiO_2$  ( $C_2S$ ), и содержащий в качестве примесей  $R_2O$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$  и другие). Установлено пять полиморфных разновидностей двухкальциевого силиката. В промышленных условиях формируется  $\beta - C_2S$ , обладающая гидравлическими свойствами. Модификации  $\alpha - C_2S$  – высокотемпературные, для их стабилизации в клинкере необходимы высокие концентрации примесей, резкое охлаждение клинкера после спекания. При медленном охлаждении в клинкере

происходит переход  $\beta - C_2S$  в  $\gamma - C_2S$ ; процесс сопровождается рассыпанием клинкера. Кристаллы белита имеют округлую форму с размером в поперечнике 20 – 50 мкм (рисунок 3.5). Белит отличается медленным ранним твердением, но вносит значительный вклад в упрочнение цементного камня при длительном твердении.

*Алюминаты кальция* портландцементного клинкера:  $3CaO \cdot Al_2O_3$  ( $C_3A$ ). Алюминатная фаза клинкера принимает в кристаллическую решетку значительное количество примесей ( $R_2O$ ,  $MgO$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ). Трехкальциевый алюминат активно гидратируется, обеспечивает быстрое схватывание и раннее твердение. Однако вклад алюминатной фазы в формирование марочной прочности цемента невелик. Повышенное содержание алюминатов кальция снижает стойкость цементного камня к сульфатной коррозии.

*Алюмоферриты кальция* – твердые многокомпонентные растворы ряда  $8CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$  ( $C_8A_3F$ ) –  $2CaO \cdot Fe_2O_3$  ( $C_2F$ ). Наиболее часто в клинкере определяют  $C_4AF$ . Состав алюмоферритов кальция зависит от  $Al_2O_3 : Fe_2O_3$  в сырьевой смеси, режима обжига и охлаждения клинкера. Алюмоферритная фаза отличается высоким содержанием примесей ( $R_2O$  до 3%,  $SO_3$  – 7%,  $MgO$  – 5%). Алюмоферритная фаза характеризуется медленным твердением в ранние сроки, но в последующем способствует достижению высокой прочности.

Трехкальциевый алюминат и алюмоферриты кальция образуют *промежуточную фазу* клинкера, которое заполняет пространство между кристаллами алита и белита. Кроме фаз – плавней ( $C_3A$ ,  $C_4AF$ ), в промежуточной фазе клинкера может быть клинкерное стекло, которое появляется при быстром охлаждении жидкой фазы. Состав клинкерного стекла близок к составу фаз – плавней.

Наряду с фазовым составом клинкера, на вяжущие свойства цемента влияет кристаллическая структура клинкера: размер кристаллов фаз и характер их распределения. Наибольшую гидравлическую активность имеют клинкеры с кристаллами 20 – 40 мкм монадобластической крупнозернистой структурой.

### 3.8 Разновидности портландцемента

Портландцемент не может в полной мере удовлетворить специфическим требованиям отдельных видов строительства. Поэтому, наряду с портландцементом, выпускают целый ряд его разновидностей, наделенных особыми свойствами.

Расширение ассортимента портландцемента обеспечивается:

– направленным изменением технологических параметров производства на стадиях подготовки сырья, обжига клинкера и помола цемента;

– регулированием химическим и фазовым составами клинкера, вещественным составом цемента и тонкостью его помола.

Основные разновидности портландцемента охарактеризованы в таблице 3.1.

Специфические особенности состава, свойства *быстротвердеющего* цемента (БТЦ) обеспечиваются тщательным выбором и подготовкой сырья, высокой однородностью и тонкостью помола сырьевой смеси. Обжиг ведут на беззольном топливе, обеспечивают резкое охлаждение клинкера. В возрасте 3 сут для БТЦ марок М 400 и М 500 предел прочности при сжатии должен быть не менее 24,5 и 27,5 МПа соответственно. Быстротвердеющий портландцемент применяют для производства железобетонных изделий с повышенной отпускной прочностью, скоростного строительства.

Добавки ПАВ (*поверхностно-активное вещество*) вводят при помоле различных видов цемента по согласованию с потребителем. Концентрацию добавок назначают в пересчете на сухое вещество добавки в процентах от массы цемента. Добавка ПАВ интенсифицирует помол, так как, адсорбируясь на поверхности клинкерных частиц, понижает их твердость, предотвращает слипание частиц цемента и налипание их на мелющие тела.

Наличие *адсорбционных оболочек* на зернах цемента обеспечивает его специфические свойства.

При применении *пластифицированного* портландцемента возможно достижение необходимой подвижности при меньшем расходе воды, что обеспечит повышение прочности и морозостойкости цементного камня. При сохранении В/Ц возможно получение требуемой подвижности и прочности при сокращении расхода цемента на 8 – 10%. Пластифицированный портландцемент применяют для изготовления монолитного бетона, при строительстве гидротехнических сооружений, дорожных и аэродромных покрытий.

*Гидрофобный* портландцемент способен придавать бетонным смесям повышенную удобоукладываемость, а бетонам – повышенную морозостойкость. Такой цемент применяют при необходимости длительного хранения и транспортировки, в гидротехническом строительстве, при устройстве дорог и аэродромов.

К *сульфатостойким* цементам относят: сульфатостойкий портландцемент, сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками (таблица 3.1), сульфатостойкий шлакопортландцемент, пуццолановый портландцемент. Специфические свойства сульфатостойких портландцементов обеспечиваются *нормированием* фазового состава клинкера. Ограничение содержания алита в ССПЦ снижает активность вяжущего: сульфатостойкий портландцемент выпускают только М400. При введении минеральных добавок ограничений содержания алита нет, и цемент характеризуется М400 и М500.

Таблица 3.1 – Основные разновидности портландцемента

Наименование цемента	Отличия от портландцемента			Особые свойства
	фазовый состав клинкера	вещественный состав цемента	тонкость помола цемента	
Быстротвердеющий портландцемент (БТЦ)	$C_3S$ 60 – 65% (не менее 50%), $C_3A$ не более 8%	Повышенное содержание гипса ( $SO_3$ 1,5 – 4,0%). Активная минеральная добавка: не более 10% (осадочные породы); не более 15% (шлаки)	Удельная поверхность 350 – 450 м <sup>2</sup> /кг	Интенсивное твердение в начальный период: <i>нормируемая</i> прочность в возрасте 3 сут и 28 сут.
<i>Цементы с ПАВ:</i> Пластифицированный портландцемент (ПЛПЦ)	Нет	Пластифицирующая добавка до 0,3%	Нет	Повышенная подвижность цементного теста при равных В/Ц (при В/Ц=0,4 расплыв конуса не менее 125 мм, для обычного – 105 мм). Пониженная Гигроскопичность при хранении и транспортировке (не впитывает воду в течение 5 мин).
Гидрофобный портландцемент (ГФПЦ)	Нет	Гидрофобизирующая добавка (асидол, мылонафт и др.) до 0,3%	Нет	
<i>Сульфатостойкие портландцементы:</i> Сульфатостойкий портландцемент (ССПЦ)	$C_3S$ не более 50%, $C_3A$ не более 5%, $C_3A + C_4AF$ не более 22%	Нет	Нет	Устойчивость к агрессивному действию сульфатных вод
<i>Сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками (ССПЦ Д5 – Д20)</i>	$C_3A$ не более 5%, $C_3A + C_4AF$ не более 22%.	Активная минеральная добавка: 10 – 20% – шлаки, 5 – 10 – осадочные породы	Нет	Устойчивость к агрессивному действию сульфатных вод



<i>Портландцемент для дорожных и аэродромных покрытий</i>	$C_3A$ не более 8%	Активная минеральная добавка (шлаки) не более 15%	Нет	Начало схватывания не ранее 2 ч. Повышенная стойкость камня к истиранию.
<i>Портландцемент для асбестоцементных изделий (ПЦ для АЦИ)</i>	$C_3S$ не менее 52% $C_3A$ 3 – 8%	Нет минеральных добавок	Остаток на сите № 008 2 – 12%, удельная поверхность 220–320м <sup>2</sup> /кг	Сроки схватывания: начало – не ранее 1 ч 30 мин, конец – не позднее 10 ч. Фильтрующие свойства. Повышенная скорость твердения.
<i>Декоративные цементы:</i> Белый портландцемент (БПЦ)	$C_3S$ 35 – 50%, $C_2S$ 35 – 50%, $C_3A$ 14 – 17%, $C_4AF$ до 1,4%	Нет	Остаток на сите № 008 не более 12%	Сроки схватывания: начало – не ранее 45 мин конец – не позднее 12 ч. По степени белизны (%): БЦ – 1 – 1 сорт (80), БЦ – 2 – 2 сорт (75), БЦ – 3 – 3 сорт (68)
Белый портландцемент с минеральными добавками	То же	Активные минеральные добавки: обожженный каолин, светлый диатомит 10 – 20%	То же	То же
Цветные портландцементы	Аналогичен белому или обычному портландцементу клинкеру	Активная минеральная добавка – не более 6%, (диатомит); пигмент – не более 15%, (минеральный), не более 0,5% (органический)	То же	Цвета: желтый розовый красный коричневый голубой зеленый черный

Производства ряда *композиционных материалов* (асбестоцемент, дорожный бетон) предъявляют к цементам требования, обусловленные особенностями технологического процесса или эксплуатационными характеристиками изделий.

*Декоративные* портландцементы используют для архитектурно-отделочных и декоративных строительных работ.

Для получения *белого* портландцемента необходимы следующие изменения в технологическом процессе:

- использование сырья с минимальным содержанием красящих оксидов: железа, марганца, титана (чистые известняки, каолины, пески);
- введение, как правило, добавки минерализатора для снижения температуры спекания клинкера;
- тонкий помол сырьевой смеси;
- применение беззольного топлива, резкое охлаждение клинкера водой;
- при измельчении сырья, клинкера необходимо исключить попадание красящих компонентов: дробильно-помольные агрегаты футеруют фарфоровыми, кремниевыми плитами; мелющие тела - кремниевые камни, «уралит».

Цветные портландцементы получают путем совместного тонкого измельчения белого или обычного портландцемента с красящими пигментами.

Введение активных минеральных добавок в декоративные цементы позволяет снизить вероятность высолообразования: добавка свяжет гидроксид кальция в гидросиликаты кальция.

### **3.9 Цементы с активными минеральными добавками**

Пуццолановый портландцемент (ППЦ) – продукт совместного помола (или тщательного смешения молотых компонентов) портландцементного клинкера *нормированного* состава, двуводного гипса и кислой АМД.

Цементный клинкер содержит не более 8 %  $C_3A$ .

Количество АМД зависит от ее происхождения: 21 – 30% – осадочные породы; 25 – 40% – вулканические породы; глина; обожженная глина.

Марки ППЦ: М300, М400.

Отличительные особенности ППЦ (по сравнению с ПЦ):

- меньшая плотность (2,7– 2,9 г/см<sup>3</sup>);
- повышенная водопотребность (НГ до 35%);
- замедленное твердение в начальные сроки при нормальных условиях;
- повышенная чувствительность к температурным параметрам твердения  
(при 10–12 °С – замедление; при 5 °С – прекращение;  
при 80– 95 °С – интенсификация);
- пониженное тепловыделение при твердении;
- повышенная водостойкость и сульфатостойкость камня;

–повышенная величина усадки и набухания; пониженная воздухоустойкость и морозостойкость.

Назначение: подводное и подземное строительство; в условиях действия мягких (простых) и сульфатных вод; повышенной влажности. *Не рекомендуется* применять: в наземных ЖБИ в условиях воздушного твердения; при пониженной температуре; в гидротехнических сооружениях, подвергающихся многократному водонасыщению и замораживанию; в морозостойких бетонах.

*Шлакопортландцемент* (ШПЦ) – продукт совместного помола (или тщательного смешения) портландцементного клинкера, двухводного гипса и шлаков (21 – 80 %; зачастую до 60 %).

Шлаки вводят в цемент в качестве АД. Предпочтительны доменные гранулированные шлаки, резкое охлаждение которых способствует образованию стекловидной фазы.

Отличительные свойства (сравнение с ПЦ):

- нормальная густота 20 – 25 %;
- медленное твердение при низких положительных температурах, ускоренное твердение при пропаривании;
- меньшее тепловыделение при твердении;
- меньшие объемные деформации;
- повышенная стойкость к коррозии;
- повышенная жаростойкость;
- большее сцепление с арматурой;
- меньшая себестоимость;
- НО: меньшая морозостойкость.

Марки ШПЦ: М300, М400, М500.

Скорость твердения ШПЦ ниже, чем ПЦ, по причине уменьшения доли клинкера. Скорость твердения ШПЦ зависит от следующих факторов:

- «клинкер : шлак» (оптимальное количество шлаков 30 – 40 %);
- фазовый состав клинкера (алитовый клинкер интенсифицирует твердение);
- структура шлака;
- тонкость помола (увеличение до 500–600 м<sup>2</sup>/кг интенсифицирует твердение, обеспечивает его сходство с ПЦ).

*Применение* ШПЦ: производство сборного железобетона, гидротехническое строительство, подземное и подводное строительство. *Не рекомендуется* использовать для бетонов, твердеющих при 10 °С и ниже при отсутствии обогрева; в условиях попеременного замораживания и оттаивания, высушивания и увлажнения.

Разновидности шлакопортландцемента: быстротвердеющий (БТШПЦ) и сульфатостойкий (ССШПЦ).

БТШПЦ получают на основе портландцементного клинкера с С<sub>3</sub>S 55–65 % и С<sub>3</sub>A 8–10 %. БТШПЦ содержит 30 – 50% шлака. Тонкость помола

400 – 500 м<sup>2</sup>/кг. При помоле и затворении вводят ускорители твердения. Марки М300, М400.

ССШПЦ получают из портландцементного клинкера с  $C_3S \leq 55\%$  и  $C_2A \leq 8\%$ . Содержание шлака – не более 45 % (в шлаке  $Al_2O_3$  не более 6 %). Удельная поверхность 400 м<sup>2</sup>/кг. Марки М300, М400.

*Шлакощелочные* вяжущие (ШЩВ) получают затворением тонкомолотого шлака (удельная поверхность не менее 300 м<sup>2</sup>/кг) водным раствором едкой щелочи (например, жидкое стекло плотностью 1,2 – 1,3 г/м<sup>3</sup> или раствор соды плотностью 1,14 – 1,16 г/м<sup>3</sup>).

Щелочной компонент составляет 5 – 15% массы шлака (на сухое вещество).

Щелочь разрушает шлаковую составляющую, обеспечивая активизацию гидратации шлака, а также входит в состав гидратов. Продукты гидратации – низко-основные ГСК, кремневая кислота, щелочные и щелочноземельные гидроалюмосиликаты, кальцит и другие. Изменение основности шлака, вида и концентрации щелочного компонента, введение специальной добавки, выбор температурного режима позволяют регулировать скорость твердения и прочностные показатели ШЩВ. Марки М500 – М800. Низкая экзотермия твердения и контракция. Стойкость камня в сульфатно-магнезиальных и пресных водах. ШЩВ способно твердеть при минус 5 – 15 °С. Морозостойкость бетонов 200 – 300 циклов.

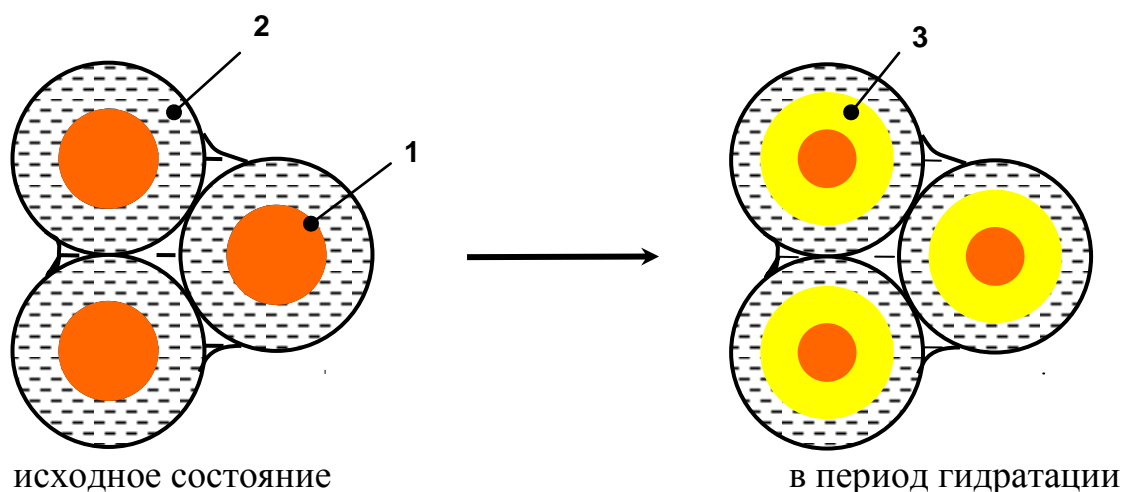
Применение ШЩВ: бетон для ЖБИ, дорожные изделия.

### 3.10 Свойства цементного теста

*Цементное тесто* – концентрированная водная суспензия, характеризуется вязкостью, коагуляционной структурой.

Цементное тесто состоит из непрореагировавших (исходных) частиц цемента; пространства между ними, заполненного водным раствором (вода, насыщенная ионами клинкерных фаз); единичных кристалликов портландита и эттрингита.

При приготовлении цементного теста вода заполняет пространства между зернами цемента и образует вокруг них *водные оболочки*. Толщина этих оболочек определяет вязкие свойства цементного теста, влияет на его подвижность. По мере гидратации на частицах цемента образуются *пленки из продуктов гидратации*. Пленки гидратов постепенно утолщаются, а водные оболочки становятся тонкими (рисунок 3.6).



1 – зерно цемента, 2 – водная оболочка, 3 – пленка гидратов

Рисунок 3.6 – Изменение состава и структуры цементного теста

Межзерновое пространство постепенно заполняется частицами гидратов, которые сцепляются между собой и скрепляют зерна непрогидратированного цемента. Цементное тесто теряет пластичность.

С течением времени взаимодействия цемента с водой протекают следующие изменения в цементном тесте:

- увеличивается масса твердой фазы за счет образования гидратов;
- уменьшается количество жидкой фазы за счет связывания воды в гидраты;
- изменяются размеры частиц твердой фазы: исходные зерна уменьшаются в размерах, а частицы гидратов постепенно укрупняются; поскольку размеры частиц гидратов меньше чем исходные, то общее количество частиц в системе значительно увеличивается.

Указанные изменения отражаются на физических свойствах системы: из подвижной высокотекучей массы она постепенно преобразуется в малоподвижную пастообразную массу, а с течением времени превращается в плотное камневидное тело.

Основные свойства цементного теста: нормальная густота, схватывание, тиксотропность, водоотделение, контракция, тепловыделение.

*Нормальная густота* цементного теста составляет 23 – 28 % и зависит от фазового состава клинкера, вещественного состава цемента, тонкости его помола, состояния воды затворения, наличия химических добавок.

С увеличением тонкости помола нормальная густота повышается, поскольку возрастает удельная поверхность частиц, которую необходимо окружить водными оболочками определенной толщины. Чрезмерно тонкий помол нецелесообразен, так как вызывает увеличение водопотребности и доли избыточной воды. Для формирования плотного цементного камня снижают расход воды для получения теста нормальной густоты, например, за счет *пластифицирующих* добавок.

*Схватывание* цементного теста зависит от фазового состава клинкера (с увеличением доли  $C_3A$  ускоряется), содержания гипса, тонкости помола цемента, наличия минеральных и химических добавок, содержания воды. При затворении цемента иногда наблюдаются *аномальные* явления: ложное схватывание, тенденция к быстрому схватыванию, быстрое схватывание.

*Ложное схватывание* – практически мгновенное загустевание цементного теста, которое после дополнительного перемешивания приобретает нормальные сроки схватывания. Различают полное и частичное ложное схватывание. Дефектом цемента является *полное ложное схватывание* – полная, но обратимая потеря подвижности цементного теста вскоре после затворения. Применение такого цемента вызывает загустевание бетонной смеси при транспортировке или во время перемешивания. Для предотвращения такого явления увеличивают расход воды, что приводит к снижению качества бетона. Причины ложного схватывания: дегидратация двуводного гипса, вызванная повышением температуры цемента при помоле; наличие свободного  $CaO$  в клинкере; присутствие щелочей в цементе. При ложном схватывании в цемент вводят пластифицирующие добавки, увеличивают длительность перемешивания.

*Тенденция к быстрому схватыванию* – частичная необратимая потеря подвижности цементного теста вскоре после затворения. Наблюдается после длительного хранения в сухой среде цемента, склонного к ложному схватыванию.

*Быстрое схватывание* – полная необратимая потеря подвижности, наступающая раньше установленного стандартом срока. Главная причина получения цемента-быстряка – недостаток гипса, введенного при помоле.

*Тиксотропная способность* цементного теста проявляется после затворения и в начале гидратации. При механическом воздействии нарушаются связи между гидратными образованиями, тесто приобретает подвижность. Это широко используется в технологии изготовления изделий из малоподвижных и жестких смесей, которые формуют с использованием вибрационных и других воздействий. Тиксотропия цементного теста возрастает с увеличением доли  $C_3A$ , снижения водоцементного отношения.

*Водоотделение* – расслоение цементного теста в результате седиментации (осаждения) твердых частиц. Водоотделение выразительно в массах с повышенным содержанием воды. Высокое водоотделение – отрицательное явление, потому что приводит к образованию неоднородных бетонных смесей и изделий из бетона, увеличивает проницаемость бетона, ухудшает сцепление цементного теста с заполнителем, арматурой. Водоотделение зависит от вида и содержания гипса в цементе, фазового состава клинкера, наличия и вида минеральных и химических добавок, тонкости помола цемента.

*Контракция* – химическая усушка (сжатие, стяжка); процесс уменьшения абсолютного объема системы «цемент – вода» вследствие гидратации.



В процессе взаимодействия цемента с водой образуются гидраты. Объем гидратов почти в 2 раза больше объема исходного цемента. Однако первоначальный суммарный объем (объем цемента + объем воды) превышает объем гидратированного цемента. Часть воды затворения переходит в «твердое» состояние, образуя гидраты (рисунок 3.7).

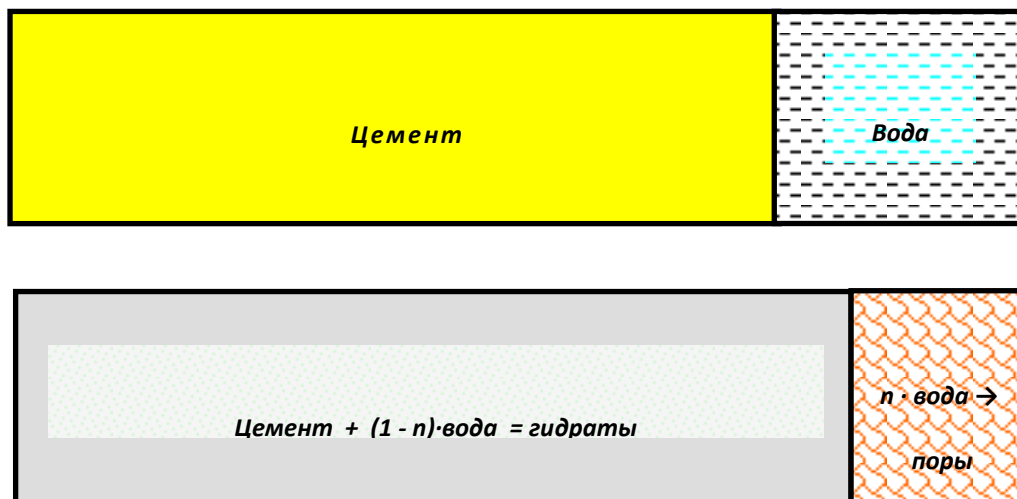


Рисунок 3.7 – Изменение составляющих цементного теста при контракции

Абсолютный объем системы не сопровождается сокращением внешнего объема цементного теста. В начале взаимодействия цемента с водой, когда тесто еще пластично и могло бы уменьшиться в объеме, контракция незначительна. В последующем контракция возрастает, но схватившееся к тому времени тесто сохраняет свой внешний объем. Поэтому результатом контракции являются поры, заполненные воздухом (или водой). *Контракционные поры* выполняют функцию амортизатора при возникновении напряженного состояния в бетоне (при тепловлажностной обработке, при замораживании воды). Контракция зависит от фазового состава клинкера (увеличивается при повышении содержания  $C_3A$ ), возрастает с увеличением тонкости помола и водоцементного отношения.

*Тепловыделение* – наблюдается в цементном тесте и в цементе камня. Тепловыделение – следствие гидратации клинкерных фаз, которая является экзотермическим процессом. Тепловыделение зависит от фазового состава клинкера (таблица 3.2). Скорость гидратации цемента меняется с течением времени, поэтому основное количество тепла начинает выделяться с началом схватывания в течение 3 – 7 сут, но тепловыделение продолжается до завершения гидратации.

Таблица 3.2 – Теплота и скорость гидратации фаз портландцементного клинкера

Фаза	Теплота гидратации, кДж/кг	Степень гидратации фаз, %, в возрасте, сут			
		1	3	10	28
C <sub>3</sub> S	350 – 500	25 – 35	не опр.	55 – 65	78 – 80
C <sub>2</sub> S	260	5 – 10	не опр.	10 – 20	30 – 50
C <sub>3</sub> A	860 – 1090	70 – 80	не опр.	не опр.	не опр.
C <sub>4</sub> AF	1450 (этtringит) 419	не опр.	50 – 70	80 – 90	не опр.

Ввиду сравнительно низкой теплопроводности бетона тепло слабо рассеивается в первые недели после укладки бетонной смеси, и температура массы поднимается на 40 – 50 °С выше температуры окружающей среды. При зимнем бетонировании тепловыделение способствует развитию гидратации и твердения, играет положительную роль. В других условиях (твердение при нормальных и повышенных температурах, например, при тепловлажностной обработке) тепловыделение способно вызвать термонапряжения в массе бетона. В результате возникают трещины, приводящие к разрушению.

Температура разогрева массы зависит от фазового состава клинкера (таблица 3.2), от тонкости помола цемента, наличия в нем минеральных и химических добавок, от температуры среды, а также от доли цемента в бетоне, толщины массива. Например, бетон с содержанием цемента 350 кг/м<sup>3</sup>, нагревается до 60°С, а бетон с расходом цемента 200 кг/м<sup>3</sup> нагревается до 24°С. Тепловыделение вынуждает ограничивать массу единовременно укладываемого бетона, сооружать температурные швы в строениях, использовать цементы с пониженным содержанием C<sub>3</sub>A и C<sub>3</sub>S, применять грубомолотые цементы с добавками инертных наполнителей (зола – унос, доменные шлаки, пуццоланы). Интенсивность тепловыделения учитывают при назначении режима тепловлажностной обработки бетонных изделий.

### 3.11 Цементный камень: состав, структура, свойства

*Цементный камень* – высокогетерогенная (неоднородная) система, состоящая из твердой фазы, жидкой фазы (тонкораспределенной воды) и пор, заполненных воздухом или водой.

Строение цементного камня напоминает бетон, В.Н.Юнг назвал цементный камень *микробетоном*.

Все три составляющие цементного камня *непрерывно изменяются с течением времени*.

*Твердая фаза* цементного камня представлена продуктами гидратации и негидратированными остатками цементных частиц. Количество непрореагировавших частиц зависит от состава фаз, дисперсности исходных зерен, количества воды затворения, условий и продолжительности твердения

цементного камня. Например, через 7 суток зерна цемента реагируют на глубину 3 мкм, а к 6 месяцам на глубину 10 мкм. Крупные частицы цемента гидратируются только с поверхности, ядра остаются нетронутыми водой, выполняя функцию микронаполнителя. Наличие негидратированных частиц в цементном камне длительного твердения свидетельствует о неполноте использования потенциала цемента.

*Продукты гидратации портландцемента* представлены кристаллическими и аморфными (гелевыми) частицами при примерном соотношении гидратов 60 – 70% : 30 – 40%.

Основным структурообразующим элементом цементного камня являются *гидросиликаты кальция* (ГСК), образованные при гидратации алита  $C_3S$  и белита  $C_2S$ . На долю гидросиликатов кальция приходится около 75% объема гидратов. ГСК характеризуются переменным составом, различной структурой и степенью закристаллизованности. Состав ГСК зависит от условий гидратации: состояния исходных фаз, количества воды, температуры среды, длительности. Состав ГСК характеризуют *основностью* – отношением  $CaO:SiO_2$ . *Низкоосновные* ГСК характеризуются  $CaO:SiO_2 = 0,8 - 1,5$ , имеют преимущественно слоистую форму частиц. *Высокоосновные* ГСК характеризуются  $CaO:SiO_2 = 1,5 - 2,0$  и выше, имеют волокнистое строение частиц. Гидросиликаты кальция с низкой основностью имеют вдвое большую прочность при растяжении по сравнению с высокоосновными фазами.

*Кристаллические* ГСК образуются при тепловой обработке, при длительном твердении. *Гелеобразные* ГСК преобладают в цементном камне нормального твердения. Слоистое строение ГСК обуславливает поглощение и отделение части воды без разрушения, что сопровождается набуханием и усадкой бетона.

Размер частиц ГСК зачастую не превышает 1 мкм. Удельная поверхность частиц ГСК 350 – 450 м<sup>2</sup>/г. Чем больше удельная поверхность гидратов, тем выше связующая способность цемента.

Наряду с гидросиликатами кальция, кристаллическую основу цементного камня формируют портландит  $Ca(OH)_2$  (15 – 20% общего количества кристаллогидратов), эттрингит, гидроалюминаты кальция. Пластинчатые, тонкие, быстро растущие кристаллы портландита, призматические и игольчатые кристаллы эттрингита, волокнистые и другие частицы гидросиликатов кальция, сростки отдельных кристаллов формируют *кристаллический каркас* цементного камня – композиционного материала.

### 3.12 Структура цементного камня

*Цементный камень – пористо – капиллярное тело.* Общая пористость в среднем составляет 30% (25 – 50% при  $V/C = 0,35 - 0,70$ ).

По характеру образования поры различают:

- *капилляры и макрокапилляры* – формируются за счет избытка воды, имеют сравнительно крупные размеры, содержат свободную воду;
- *микрокапилляры* – возникают при формировании структуры цементного камня за счет воды, удерживаемой адсорбционными и капиллярными силами; при деструкции; при перекристаллизации гидратов;
- *контракционные поры* – результат химической усадки «цемент – вода»;
- *ультрамикрокапилляры и поры геля* – часть структуры гелевых гидратов.

Кроме того, поры образуются из-за несовершенного перемешивания, плохого уплотнения и нарушения режима твердения цементного теста.

По *размеру* поры классифицируют:

- *ультрамалые, межкристаллитные* – не более 1 нм ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ );
- *микропоры, гелевые поры, сверхмалые* – 1 – 10 нм;
- поры между частицами геля, капиллярные поры – 10 – 100 нм;
- *макропоры* – крупнее 1000 нм.

Пористость цементного камня меняется с течением времени твердения. В ранние сроки основная масса пор – макрокапилляры. С увеличением времени твердения суммарная пористость уменьшается: цементный камень уплотняется, так как объем продуктов гидратации больше объема исходного цемента. При этом объем мелких и ультрамалых пор возрастает за счет увеличения в твердой фазе геля (гель заполняет крупные поры, их число сокращается).

Поры – неотъемлемая часть структуры цементного камня, обусловленная характером гидратации и твердения. Полное исключение пор невозможно. Для обеспечения высоких технических характеристик цементного камня предпочтительно: минимальный объем общей пористости, замкнутые, мелкие, равномерно распределенные поры.

Пористость цементного камня зависит от дисперсности, фазового и вещественного состава цемента, водоцементного отношения, температурного режима и сроков твердения, степени и скорости гидратации цемента, состава гидратов.

### **3.13 Формирование прочности цементного камня**

Прочность цементного камня – результат твердения портландцемента, которое достигается за счет связывания гидратов в конгломератную структуру.

В формировании прочности цементного камня выделяют два этапа:

– *1 этап* – появление *кристаллических* гидратов (портландит, эттрингит, гидросиликаты и гидроалюминаты кальция), рост размеров кристаллов, срастание кристаллов, увеличение числа контактов между ними. В результате из отдельных кристаллов образуются агрегаты, которые затем объединяются в пространственный каркас. На 1 этапе ведущая роль в

формировании и упрочнении цементного камня принадлежит *кристаллическим* гидратам.

– *2 этап* – в уже сформированном каркасе цементного камня продолжают рост числа кристаллов и их укрупнение, увеличивается закристаллизованность, появляется значительное количество гелеобразных гидратов. Укрупнение кристаллов сопровождается уменьшением числа и площади контактов. Все эти процессы происходят в жесткой структуре и поэтому вызывают внутренние напряжения. Как результат – возможность появления трещин, снижение прочности структуры. На 2 этапе возникает конфликтная ситуация – появление крупных прочных кристаллов вызывает нарушение целостности структуры цементного камня (*деструктивные процессы*). Следовательно, кристаллические гидраты играют отрицательную роль на 2 этапе. Упрочнение цементного камня в этот период достигается за счет гелеобразных гидратов. *Гель* – пластичная матрица, которая предотвращает деструктивные процессы и обеспечивает реализацию прочности хрупких кристаллов путем их соединения в конгломерат.

Функции *гелеобразных* гидратов в структуре цементного камня:

- элемент структуры, обладающий определенной прочностью;
- заполнение пор, кольматация трещин, «залечивание» дефектов структуры цементного камня;
- соединение кристаллов в конгломерат без жесткого закрепления элементов структуры; это снижает напряжения в камне, предотвращает деструкцию.

Для стабильного упрочнения цементного камня необходимо: в ранние сроки (до 3 сут) формирование большого количества кристаллических гидратов; в последующем (после 7 сут) преобладание гелеобразных гидратов. Наибольшие значения прочности цементного камня характерны для структуры, состоящей из 60 – 65% кристаллических гидратов и 35 – 40% гелей. Повышение доли кристаллогидратов сопровождается снижением прочности цементного камня. Уменьшение кристаллогидратной составляющей вызывает замедление темпов упрочнения.

Твердение цементного камня сопровождается не только его упрочнением, наблюдаются периоды замедления роста и даже сброса прочности. Это обусловлено *деструктивными процессами*, причинами которых являются:

- *внутренние напряжения*, возникающие при быстром увеличении объема твердой фазы за счет ускоренной гидратации, при формировании значительного количества кристаллогидратов;
- *перекристаллизация* – превращение первичных кристаллогидратов, обладающих лучшей армирующей способностью, во вторичные гидраты, например,  $3C_2AH_8 \rightarrow 2C_3AH_6 + AH_3 + 9H$  ;
- увеличение пористости цементного камня при превращениях, сопровождающихся выделением воды, разрыхлением структуры:  $XH_2 \rightarrow XH + H$ .

### 3.14 Факторы, влияющие на гидратацию, твердение и прочностные свойства портландцемента

Гидратация, твердение, упрочнение – тесно связанные процессы. Факторы, влияющие на гидратацию, изменяют также ход твердения. Однако характер влияния фактора на гидратацию и твердение не всегда однозначен.

Процессы гидратации и твердения в первую очередь зависят от состава цемента: фазового, вещественного и дисперсного.

*Фазовый состав портландцементного клинкера.* С увеличением доли  $C_3S$  и  $C_3A$  гидратация цемента ускоряется, интенсифицируется начальное твердение. Однако при весьма высоких содержаниях  $C_3S$  и  $C_3A$  наблюдается замедление роста прочности в поздний период, возможны сбросы прочности. Поэтому максимальное содержание фаз ограничивают значениями 65 – 75%  $C_3S$ , 12 – 14%  $C_3A$ . Фазы  $C_2S$ ,  $C_4AF$  обеспечивают рост прочности цементного камня в отдаленные сроки твердения.

*Вещественный состав цемента.* Оптимальные концентрации двуводного гипса способствуют регулированию сроков схватывания и ускорению твердения цемента на раннем этапе.

Введение активной минеральной добавки (АМД) ускоряет гидратацию цемента, однако скорость твердения и показатели прочности цементного камня имеют тенденцию к уменьшению (особенно при повышенной доле АМД).

*Дисперсный состав цемента.* Чем тоньше частицы цемента, тем быстрее протекает гидратация и интенсивнее процессы твердения. Это обусловлено большей площадью взаимодействия цемента и воды; наличием активированной поверхности цемента (тонкий помол нарушает кристаллическую структуру); небольшой толщиной экранирующих оболочек на зернах цемента.

Однако чрезмерно тонкое измельчение цемента приводит к снижению темпов позднего твердения и значений абсолютной прочности камня. Это обусловлено следующими причинами:

- рыхлостью структуры цементного камня, связанной с образованием многочисленных пор за счет увеличения водопотребности тонкомолотого порошка;
- меньшей площадью контактов между гидратами – крупными, быстро сформированными кристаллами;
- деструктивными процессами.

Кроме того, сроки хранения тонкомолотых вяжущих ограничены из-за быстрой потери активности. На поверхности цементных частиц образуются пленки из гидратов, возникших при взаимодействии цемента с парами воды.

Для получения быстротвердеющего высокопрочного цемента необходимо: размер зерен 3 – 30 мкм; удельная поверхность 350 – 450 м<sup>2</sup>/кг (с учетом фазового состава клинкера).



Характер процессов гидратации и твердения цемента существенно зависит от состава исходной массы и внешних условий: водоцементного отношения, наличия химических добавок, температуры и влажности окружающей фазы.

*Водоцементное отношение (В/Ц).* Значения В/Ц должны обеспечить необходимое количество воды для гидратации цемента и для получения удобоформуемого пластичного теста. Обеспечение последнего сопровождается образованием избытка воды (раздел 1.3). Обилие воды затворения обеспечивает условия для ускоренной гидратации цемента, однако формирующийся камень медленно упрочняется и имеет невысокие значения прочности из-за большого количества капиллярных пор в структуре.

*Химические добавки.* Присутствие в воде затворения даже небольших количеств растворенных веществ может изменить скорость гидратации, состав гидратов, ход процесса твердения.

Добавки, вводимые в цемент при помоле или при затвердении водой, предназначены с целью:

- снижения водопотребности или разжижения цементных систем (пластифицирующие);
- регулирования сроков схватывания путем ускорения или замедления процессов гидратации;
- ускорения твердения, например, добавка  $\text{CaCl}_2$ ;
- интенсификации твердения при пониженных температурах, например,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ;
- регулирования пористости структуры цементного камня (для минимизации пор или для образования мелких замкнутых воздушных пор).

Скорость гидратации и твердения зависит также от состояния (структуры) воды. Например, вода, обработанная магнитным или электрическим полем, способна ускорить гидратации, увеличить прочность камня.

Во избежание влияния вредных примесей на процессы гидратации и твердения осуществляют предварительный контроль состава воды в соответствии с нормативными требованиями.

*Температура и влажность окружающей фазы.* Нормальные условия твердения цемента: температура  $20 \pm 2$  °С, влажность 90 – 100%. Важнейшим условием для гидратации и твердения является наличие воды в жидком состоянии в период активного протекания процессов. При испарении воды (наблюдается при влажности среды 40% и ниже) гидратация и твердение прекращаются.

При *понижении* температуры до 10 °С и до «–» 1 °С скорость гидратации и твердения резко уменьшается в 2 – 3 раза. Например, степень гидратации цемента составляет 18 – 26% при «–» 1 °С; 5 – 6% при «–» 5 °С; 1 – 2% при «–» 20 °С. Это обусловлено уменьшением скорости растворения клинкерных фаз в воде, превращением большей части воды в

лед. Причем, чем ниже активность цемента и выше В/Ц, тем ниже скорость гидратации и твердения. Для ускорения твердения материалов в условиях низких температур рекомендуют использовать быстротвердеющие цементы с 55 – 60%  $C_3S$ , 10 – 13%  $C_3A$ ; цементы, измельченные до удельной поверхности 400 – 500  $m^2/kg$ . Кроме того, в воду затворения вводят химические добавки, ускоряющие гидратацию и твердение; снижающие температуру замерзания воды.

При *повышении* температуры в интервале 20 – 100 °С, а особенно до 175 – 200°С (автоклавная обработка) скорость гидратации значительно возрастает. При повышении температуры среды до 100°С механизм гидратации остается прежним. Состав гидратов изменяется мало. Однако структура цементного камня претерпевает существенные изменения: огрубляется за счет повышения степени закристаллизованности фаз и укрупнения кристаллов. В результате этих преобразований, а также перекристаллизации неустойчивых гидратов возможны деструктивные процессы, снижающие прочность камня.

Влияние повышенной температуры на скорость гидратации широко используют на практике при производстве железобетонных изделий. Тепловлажностная обработка – эффективный способ ускорения твердения бетона. Однако во избежание отрицательного влияния повышенной температуры на свойства бетона режим твердения выбирают с учетом фазового состава клинкера, вещественного состава цемента, активности цемента, наличия химических добавок, соотношения В/Ц. Например, для пропаривания эффективны среднеалюминатные цементы ( $C_3S$  50 – 60%,  $C_3A$  6 – 9%). Максимальная температура обработки бетона на основе портландцемента не более 80 – 85 °С. При повышенных температурах клинкерные фазы образуют более плотные гидраты с меньшим содержанием воды. Оболочки из таких гидратных образований затрудняют доступ воды к негидратированному ядру частиц, что снижает полноту гидратации цемента. Увеличение скорости гидратации при повышенных температурах способствует увеличению теплоты экзотермических процессов, дополнительному нагреву бетона и его высыханию. Для компенсации отрицательного влияния повышенных температур на структуру цементного камня в цемент вводят активные минеральные добавки. Это позволяет также повысить температуру изотермического прогрева и вовлечь минеральную добавку в процессы гидратации и структурообразования.

*Структура цементного камня.* Теоретический предел прочности цементного камня при сжатии составляет 1240 – 1370 МПа. Практически при формировании бетонов под пригрузом получены бетоны с прочностью 280 – 320 МПа.

Существенный недостаток цементного камня – значительная разница между прочностью при сжатии и при растяжении. Последняя почти на порядок ниже, что объясняют особенностями структуры цементного камня. Основу структуры составляют переплетенные друг с другом короткие волокна гидросиликатов кальция. При растяжении отдельные волокна

сравнительно легко выдергиваются из переплетенной массы, и собственная прочность волокон практически не используется. Это обуславливает необходимость армирования цементного камня волокнистыми наполнителями.

### 3.15 Деформации цементного камня

*Равномерность изменения объема цементного камня при твердении.* Для твердеющего цементного камня характерно равномерное изменение объема, включающее усадку или набухание. Возникающие при этом деформации невелики (0,1 – 1,0%) и не приводят к разрушению цементного камня.

Иногда твердение цементного камня сопровождается неравномерным изменением объема, которое проявляется в образовании трещин и разрушении бетонных изделий.

Основные *причины* неравномерного изменения объема:

- гидратация свободного  $CaO$  (при содержании более 1%);
- гидратация свободного  $MgO$  (при содержании более 5%);
- образование в затвердевшем камне *вторичного этtringита* вследствие повышенной доли двуводного гипса, введенного при помоле цемента.

Перечисленные реакции сопровождаются увеличением объема и возникновением внутренних растягивающих напряжений.

Цемент, проявляющий неравномерное изменение объема, *не может* быть сразу использован. Цемент выдерживают в силосах, пока часть свободного оксида кальция не погасится. Кроме того, в цемент вводят минеральные добавки.

*Усадка цементного камня.* Усадка наблюдается в цементном камне, длительно находящемся в воздушной среде, относительная влажность которой ниже влажности цементного камня (первые проявления усадки возможны при относительной влажности воздуха менее 60%).

*Усадка* – уменьшение объема и массы цементного камня (бетона) при высыхании.

Основные *причины* усадки:

- удаление воды из *продуктов гидратации* цементного камня;
- старение геля цементного камня с течением времени твердения;
- *карбонизация* продуктов гидратации;
- *контракция*.

Указанные процессы сопровождаются обезвоживанием геля, сжатием и сближением слоев гидратов. В цементном камне развиваются капиллярные силы сжатия, которые способствуют уменьшению его объема. Сформировавшаяся структура цементного камня противостоит сжатию. Деформации сопровождаются сильными напряжениями в цементном камне, и когда напряжения превышают предел прочности при растяжении цементного камня, появляются микро- и макротрещины.

Усадка цементного камня составляет 3 – 5 мм/м (или 0,3 – 0,5%).

Усадка – свойство, присущее цементному камню и зависящее от его состава и структуры.

Основные *факторы*, определяющие усадку цементного камня:

– *фазовый состав портландцементного клинкера*; усадка монофазных цементов в возрасте 28 сут составляет, мм/м: 0,46 –  $C_3S$ ; 0,77 –  $C_2S$ ; 2,34 –  $C_3A$ ; 0,49 –  $C_4AF$ ; следовательно, цементы с повышенным содержанием  $C_2S$  и  $C_3A$  имеют большую склонность к усадке;

– *вещественный состав цемента*: наличие наполнителей, минеральных добавок снижает усадку (при условии, что их введение не сопровождается увеличением водопотребности цемента);

– *тонкость помола цемента*: увеличение дисперсности способствует повышению усадочных деформаций;

– *водоцементное отношение (В/Ц)*: с повышением В/Ц усадка цементного камня возрастает;

– *условия твердения*: тепловлажностная обработка уменьшает способность цементного камня к усадке, так как при этом режиме твердения уменьшается содержание геля в цементном камне;

– *возраст цементного камня*: основные усадочные деформации наблюдаются в течение первых 180 сут.

Для компенсации усадочных деформаций в цемент вводят специальные добавки, проявляющие способность расширяться при твердении.

Склонность цементного камня к усадке исключает возможность и целесообразность изготовления изделий из цементного теста. Наличие заполнителей в бетоне, служащих жестким каркасом, обеспечивает снижение усадки материала до 0,3 – 0,8 мм/м.

Полное высушивание вызывает *необратимую усадку* цементного камня, которая составляет 30 – 50% полной усадки. Причина необратимой усадки-разрывы, микротрещины, усиление сцепления между частицами геля.

*Набухание цементного камня*. Это явление, противоположное усадке, и проявляется при длительном пребывании цементного камня в воде.

*Набухание* – увеличение объема и массы цементного камня, обусловлено:

– взаимодействием с водой, при котором цементный гель адсорбирует воду на своей развитой поверхности (проникающая вода раздвигает слои гидратных образований);

– расклинивающим действием тонких пленок воды.

Набухание зависит от факторов, определяющих пористость цементного камня, например, при увеличении В/Ц набухание возрастает. При ограниченном набухании структура цементного камня уплотняется. При набухании изменение линейных размеров составляет 0,1 – 0,3 мм/м.

*Ползучесть цементного камня* - необратимые деформации под действием длительно приложенных нагрузок. Ползучесть обусловлена пластическими свойствами цементного камня, изменениями его состояния.

Основные *факторы*, определяющие ползучесть цементного камня:

- величина приложенной нагрузки;
- фазовый состав клинкера: при увеличении содержания  $C_2S$  и  $C_3A$  ползучесть возрастает;
- водоцементное отношение: при увеличении В/Ц (0,45 и выше) наблюдается повышение ползучести;
- факторы, ускоряющие гидратацию, снижают ползучесть;
- возраст цементного камня на момент приложения нагрузки: цементный камень длительного твердения проявляет меньшую склонность к ползучести;
- условия твердения: тепловлажностная обработка, сопровождающаяся огрублением структуры гидратов цементного камня, снижает ползучесть.

### 3.16 Морозостойкость цементного камня

*Морозостойкость* цементного камня – способность материала, насыщенного водой, сопротивляться образованию и накоплению повреждений, вызванных попеременным замораживанием и оттаиванием.

Разрушительное воздействие многократных изменений температуры связано с деформациями расширения, обусловленными:

- *напряжениями*, возникающими в результате увеличения объема замерзающей воды (примерно на 9%), находящейся в порах и капиллярах;
- *гидростатическим давлением* замерзающей заземленной воды, не имеющей контакта с окружающей средой;
- различием *коэффициентов линейного расширения* льда и каркаса цементного камня.

В развитии процесса разрушения при морозе исключительно важна капиллярно-пористая структура цементного камня и бетона. Замерзание воды в цементном камне происходит *неодновременно*: при  $0 - \llcorner \rightarrow \lrcorner 3 \text{ }^\circ\text{C}$  – свободная вода в пустотах и макропорах; при  $\llcorner \rightarrow \lrcorner 25 \text{ }^\circ\text{C}$  – вода в тонких капиллярах; при  $\llcorner \rightarrow \lrcorner 60 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$  – вода в гелевых порах (следовательно, мелкие поры не опасны). Максимальное увеличение объема льда наблюдается при  $\llcorner \rightarrow \lrcorner 5 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$  и составляет 1–2 мм/м.

Морозостойкость цементного камня зависит от следующих *факторов*:

- *фазовый состав клинкера*: наибольшей морозостойкостью отличаются алитовые низкоалюминатные цементы;
- *вещественный состав цемента*: наличие активных минеральных добавок вызывает снижение морозостойкости, главным образом, за счет повышенного количества воды, адсорбированного добавкой;
- *тонкость помола*: умеренно высокая тонкость помола ускоряет гидратацию, способствует упрочнению и повышению морозостойкости цементного камня; чрезмерно тонкий помол, сопровождающийся повышением водопотребности цемента, снижает морозостойкость камня;
- *водоцементное отношение*: при понижении В/Ц морозостойкость цементного камня уменьшается;

– *условия твердения*: тепловлажностная обработка уменьшает стойкость цементного камня к морозному разрушению;

– *характер пористости цементного камня*: минимизация капилляров, макропор и формирование некоторого объема замкнутых воздушных мелких пор способствуют повышению морозостойкости; пористость регулируют за счет введения пластифицирующих и воздухововлекающих добавок.

### 3.17 Коррозия цементного камня

*Коррозия* – процесс самопроизвольного разрушения цементного камня в результате действия физических и (или) химических факторов, возникающих как внутри камня, так и вне его структуры.

*Физическую коррозию* связывают с понижением температуры под действием попеременного замораживания и оттаивания; с влажностными колебаниями среды; с подсосом и кристаллизацией солей в порах.

*Химическую коррозию* обуславливают воздействия агрессивных сред.

Выделяют три вида химической коррозии, отличающиеся составом агрессивной среды, характером превращений в цементном камне (таблица 3.3).

Наиболее уязвимой и реакционноспособной составляющей цементного камня является  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , образующийся в основном при гидратации алита  $\text{C}_3\text{S}$ .

Взаимодействие  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с различными веществами, растворенными в воде, или растворение самого  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – *одно из главных условий для развития коррозии*.

При коррозии *первого вида* скорость разрушительных процессов прямо пропорциональна скорости фильтрации воды. Несмотря на ограниченное содержание  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в цементном камне, понижение  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ведет к разрушению кристаллического сростка. Поскольку по мере уменьшения концентрации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  снижается устойчивость сначала высокоосновных, а затем и низкоосновных гидросиликатов кальция.

Коррозию *второго вида* вызывают кислые воды. Агрессивность определяют по величине pH. Условия при pH, *меньших 6,5*, опасны для цементного бетона.

Коррозия *третьего вида* наиболее разрушительна. Возникает под влиянием морской или засоленной грунтовой воды. Сульфатоалюминатная коррозия происходит за счет образования *вторичного этtringита* (гидросульфатоалюмината кальция)  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ , растущие кристаллы которого оказывают кристаллизационное давление на стенки пор, вызывают внутренние растягивающие напряжения и, как следствие, разрушение камня. При образовании этtringита объем исходной массы увеличивается в 2 раза.



Таблица 3.3 – Виды химической коррозии цементного камня

Вид коррозии	Состав агрессивной среды	Химические превращения в цементном камне	Изменение структуры цементного камня	Меры защиты цементного камня от разрушения
<i>Первый вид:</i> коррозия выщелачивания	Воды <i>пресные:</i> при фильтрации, при непрерывном омывании	$\text{Ca(OH)}_2$ растворяется в воде и выносится из цементного камня	Увеличение пористости, ослабление структуры	Ограничение содержания $\text{C}_3\text{S}$ – основного поставщика $\text{Ca(OH)}_2$ . Введение АМД, связывающих $\text{Ca(OH)}_2$ в ГСК. Повышение плотности структуры камня
<i>Второй вид:</i> углекислая  общекислотная	Воды, содержащие в избытке $\text{CO}_2$ (агрессивную углекислоту)  Воды, содержащие минеральные, органические кислоты ( <i>кислые воды</i> )	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaCO}_3 \downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$ . $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(HCO}_3)_2$ . $\text{Ca(OH)}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .	Увеличение пористости, капилляров в структуре за счет вымывания <i>легкорастворимых</i> продуктов реакции между составляющим и цементного камня $\{\text{Ca(OH)}_2\}$ и растворенным в воде веществом	Ограничение содержания $\text{C}_3\text{S}$ – основного поставщика $\text{Ca(OH)}_2$ . Введение АМД, связывающих $\text{Ca(OH)}_2$ в ГСК. Повышение плотности структуры камня
<i>Третий вид:</i>	Минерализованные воды, содержащие соли <i>соляной</i> (хлориды) и <i>серной</i> (сульфаты)			

сульфоалюминатная	кислот Воды с <i>малой</i> концентрацией сульфатов ( $SO_4^{2-}$ )	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 3CaSO_4 + 26H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$	Образование трещин и разрушение цементного камня за счет кристаллизации и накопления в порах камня	Ограничение содержания $C_3A$ , $C_3S$ . Введение АМД.
<i>гипсовая</i>	Воды высокой концентрацией сульфатов ( $SO_4^{2-}$ )	$Ca(OH)_2 + RSO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + R(OH)_2$ , $R = Mg^{2+}, Al^{3+}, Na^+, K^+$ .	+ труднорастворимых солей, отличающихся большим объемом, чем исходные составляющие цементного камня	Повышение плотности структуры камня.
магнезиальная	Воды, содержащие соли магния	$Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + CaSO_4 \cdot 2H_2O$ . $Ca(OH)_2 + MgCl_2 + 4H_2O \rightarrow CaCl_2 \cdot 2H_2O + Mg(OH)_2$ .	Наряду с образованием труднорастворимых растущих кристаллов, образуется труднорастворимый гидрат $Mg(OH)_2$ , закупоривающий поры и препятствующий проникновению агрессивной среды внутрь камня	Увеличение доли $C_3S$ , минимизация доли АМД.

Основные меры защиты цементного камня от разрушающего действия любого вида коррозии представлены двумя группами:

– *физические* – рациональный подбор состава бетонной смеси; минимизация избытка воды; использование интенсивных методов

уплотнения бетона, способствующих формированию плотной структуры; введение воздухововлекающих добавок для создания резерва мелких замкнутых пор для «размещения» растущих кристаллов вторичного этtringита; нанесение на поверхность бетона непроницаемых покрытий;

– *химические* – предусматривают изменение фазового состава: ограничение  $C_3S$  – как основного источника образования  $Ca(OH)_2$ ; однако значительное сокращение  $C_3S$  приведет к существенному понижению прочности; целесообразно при сохранении содержания  $C_3S$  обеспечить связывание гидроксида кальция активной минеральной добавкой (АМД):  $Ca(OH)_2 + SiO_2 + nH_2O \rightarrow CaO \cdot SiO_2 \cdot (n+1)H_2O$  – реакция *пуццоланизации*; для защиты от сульфаталюминатной коррозии необходимо ограничение  $C_3A$  за счет замещения его  $C_4AF$ .

### 3.18 Глоссарий

Понятие	Содержание
Вяжущие вещества	Предназначены для синтеза искусственного технического камня, обладающего определенным комплексом свойств; для сочленения в единое целое различных элементов, а также объединения строительных деталей в сооружение.
Минеральные вяжущие вещества	Порошкообразные материалы, которые при смешивании (затворении) с водой (или другой жидкостью) образуют пластичную массу (тесто), со временем самопроизвольно затвердевающую в камневидное тело.
Воздушные вяжущие вещества	После затворения водой твердеют, набирают и длительно сохраняют прочность только на воздухе. При длительном воздействии воды они снижают прочность и разрушаются.
Гидравлические вяжущие вещества	После затворения водой и предварительного затвердевания в воздушной среде продолжают твердение и наращивание прочности в воде.
Тонкость помола вяжущего	Характеристика размеров зерен. Выражают остатком (%) на ситах со стандартными размерами ячеек; удельной поверхностью ( $m^2/kg$ ; $cm^2/g$ ), зерновым составом (%).
Удельная поверхность вяжущего	Суммарная площадь поверхности всех частиц в единице массы порошка ( $m^2/kg$ ; $cm^2/g$ ).
Водопотребность вяжущего	Количество воды, необходимое для получения теста заданной пластичности (подвижности).
Нормальная густота теста вяжущего	Консистенция с регламентированной подвижностью, которую определяют по специальным стандартным методикам с учетом

	особенностей вяжущего.
Нормальная густота вяжущего	Минимальное количество воды (% массы вяжущего), необходимое для получения теста стандартной (определенной) консистенции.
Сроки схватывания теста вяжущего	Период времени от момента затворения вяжущего до полной потери пластичности.
Начало схватывания теста вяжущего	Время от момента затворения до момента начала загустевания, потери пластичности.
Конец схватывания теста вяжущего	Время от момента затворения до момента полного загустевания, когда тесто превращается в твердое тело, не обладающее еще значительной прочностью.
Коэффициент размягчения	Отношение прочности образцов в водонасыщенном состоянии к прочности образцов, высушенных до постоянной массы
Твердение вяжущего	Превращение теста вяжущего в камень и дальнейшее упрочнение последнего. Обусловлено гидратацией вяжущего, кристаллизацией гидратов, формированием кристаллического сростка. Достигается за счет скрепления отдельных гидратов в единую структуру камня.
Коагуляционная структура	Рыхлая пространственная сетка, образованная за счет энергии межмолекулярного притяжения частиц системы (силы Ван – дер – Ваальса), поэтому имеет невысокую прочность. Частицы теста вяжущего связаны друг с другом через прослойку жидкости дисперсионной среды (воды), которая играет роль «смазки». Тесто с коагуляционной структурой пластично, разрушенная структура легко восстанавливается.
Кристаллизационная структура	Частицы, образующие пространственный каркас, связаны между собой химическими (валентными) связями. Не обладают пластичностью и разрушаются необратимо. Образование кристаллизационных структур характерно для стадии твердения теста вяжущего.
Тиксотропность	Способность коагуляционной структуры разрушаться за счет динамических воздействий и самопроизвольно восстанавливаться после прекращения воздействий.
Низкообжиговые	Получают обработкой гипса при температуре

гипсовые вяжущие вещества	130 – 180 <sup>0</sup> С; состоят в основном из полуводного гипса (полугидрата) CaSO <sub>4</sub> ·0,5H <sub>2</sub> O. Разновидности: строительный гипс, высокопрочный гипс, формовочный гипс, технический гипс, медицинский гипс.
Высокообжиговые гипсовые вяжущие вещества	Получают обработкой гипса при температуре 600 – 1000 <sup>0</sup> С; состоят преимущественно из безводного сульфата кальция – ангидрита CaSO <sub>4</sub> . Разновидности: ангидритовые вяжущие, эстрих – гипс (высокообжиговый гипс);
β – модификация полугидрата CaSO <sub>4</sub> ·0,5H <sub>2</sub> O	Образуется при низкотемпературной обработке гипса при атмосферном давлении (P = 0,1 МПа) в открытых аппаратах. Представлена мельчайшими агрегатами плохо окристаллизованных зерен. Характеризуется высокой водопотребностью, ускоренной гидратацией и схватыванием.
α – модификация полугидрата CaSO <sub>4</sub> ·0,5H <sub>2</sub> O	Образуется при низкотемпературной обработке гипса в атмосфере, насыщенной водяным паром (при избыточном давлении пара P = 0,2 – 0,3 МПа) в герметически закрытых аппаратах. Кристаллы имеют крупные размеры, четкую огранку и плотно упакованы. При затворении потребляется меньшее количество воды, чем для β – полугидрата. Затвердевший камень имеет плотную структуру и высокую прочность
Гипсоцементно-пуццолановое вяжущее (ГЦПВ)	Получают совместным помолом или смешением измельченных компонентов, %: гипсовое вяжущее 50 – 65; портландцемент 20 – 25; активная минеральная добавка 15 – 25.
Эстрих-гипс	Высокообжиговое гипсовое вяжущее. Содержит, наряду с нерастворимым ангидритом, оксид кальция (2 – 3 %), который образуется в результате частичного разложения CaSO <sub>4</sub> при 750 – 1000 <sup>0</sup> С.
Ангидритовое вяжущее	Высокообжиговое гипсовое вяжущее. Содержит нерастворимый ангидрит, щелочные активизаторы: (гашеная или негашеная известь, обожженный доломит, основной доменный шлак) или сульфатные активизаторы (сульфат натрия, сульфат кальция, железный купорос, сульфат алюминия).
Вискозиметр Суттарда	Прибор – полый цилиндр определенного размера для оценки подвижности (нормальной густоты) гипсового теста.

Прибор Вика с иглой	Устройство для определения сроков схватывания теста минеральных вяжущих.
Прибор Вика с пестиком	Устройство для определения подвижности (нормальной густоты) цементного теста.
Строительная воздушная известь	Продукт умеренного обжига кальцево-магниевого карбонатных пород, содержащих не более 8% глинистых и песчаных примесей. Состоит в основном из CaO.
Комовая известь – кипелка	Кускообразный продукт обжига кальцево-магниевого карбонатных пород. Состоит в основном из CaO.
Молотая известь	Порошкообразный продукт помола комовой извести.
Гашение	Технологический процесс, используемый только в производстве извести. Взаимодействие извести с водой, сопровождается реакцией гидратации CaO; выделением большого количества теплоты, увеличением объема продукта гашения; диспергацией частиц извести.
Гидратная известь – пушонка	Порошок, полученный при гашении извести ограниченным количеством воды (50 – 80% массы извести – кипелки); состоит в основном из Ca(OH) <sub>2</sub> .
Известковое тесто	Пластичная масса, полученная при гашении извести повышенным количеством воды (150 – 250 % массы извести – кипелки); состоит из 50 – 60% Ca(OH) <sub>2</sub> и 40 – 50% H <sub>2</sub> O.
Известковое молоко	Суспензия, полученная при гашении извести значительным количеством воды (не менее 300 % воды массы извести – кипелки); состоит из Ca(OH) <sub>2</sub> и H <sub>2</sub> O; частицы Ca(OH) <sub>2</sub> находятся во взвешенном состоянии в воде.
Активность извести	Суммарное содержание оксидов кальция и магния, которые взаимодействуют с водой в течение 5 – 30 мин с момента затворения. Выражают в процентах (например, 90; 95%).
Недожог извести	Образуется при недостаточной температуре обжига (например, в центре крупных кусков); представляет собой неразложившийся CaCO <sub>3</sub> .
Пережог извести	Получается при чрезмерно высокой температуре и длительном обжиге, при содержании примесей в сырье; «намертво» обожженные частицы, в которых CaO представлен крупными плотными кристаллами, медленно взаимодействующими с



	водой.
Гидратное (гидратационное) твердение извести	Происходит при затворении водой молотой негашеной извести. Температура окружающей среды $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Конечный продукт твердения $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Прочность камня 2 – 5 МПа.
Карбонатное твердение извести	Происходит в известковом тесте при нормальной температуре среды. Конечный продукт твердения $\text{CaCO}_3$ . Процесс протекает медленно. Прочность камня 0,5 – 1,5 МПа.
Гидросиликатное твердение извести	Происходит в смеси извести и тонкомолотого кремнеземистого компонента в гидротермальных условиях ( $T = 175 - 200^{\circ}\text{C}$ , $P = 0,9 - 1,3$ МПа). Продукт твердения гидросиликаты кальция. Прочность камня 10 – 30 МПа.
Магнезиальные вяжущие	Продукт умеренного обжига и последующего помола магнезиальных карбонатных пород. Содержат в качестве активной фазы $\text{MgO}$ . Разновидности: каустический магнезит и каустический доломит.
Гидравлическая известь	Продукт обжига не до спекания мергелистых известняков, содержащих 8 – 20% глинистых и песчаных примесей. Фазовый состав гидравлической извести, %: $\text{CaO}$ 5 – 65; $\text{C}_2\text{S}$ , $\text{C}_2\text{F}$ , $\text{CA}$ , $\text{C}_2\text{AS}$ и другие 35 – 95.
Романцемент	Продукт обжига и последующего помола мергелей (мергель – природная смесь карбоната кальция и глинистых минералов, содержание, которых более 25 %). При помоле обожженного материала вводят добавку 5 % гипса и до 15 % АМД. Состав обожженного материала: $\text{C}_2\text{S}$ , $\text{C}_2\text{AS}$ , $\text{CA}$ , $\text{C}_{12}\text{A}_7$ , $\text{C}_2\text{F}$ , $\text{C}_4\text{AF}$ и $\text{CaO}$ (до 2–3 %).
Портландцемент	Гидравлическое вяжущее, полученное совместным тонким помолом портландцементного клинкера и двуводного гипса.
Портландцементный клинкер	Продукт спекания сырьевой смеси заданного состава. Представляет собой гранулы черного цвета с размером 10 – 60 мм. Портландцементный клинкер – носитель вяжущих свойств; полуфабрикат в производстве портландцемента

Активные минеральные добавки (АМД)	Природные и искусственные вещества, которые не обладают вяжущими свойствами, но, будучи смешанными в тонкодисперсном состоянии с известью, при затворении водой образуют тесто, способное после твердения на воздухе продолжать твердеть и в воде. АМД вводят для снижения доли клинкера (снижения себестоимости цемента), для повышения водостойкости и улучшения антикоррозионных свойств цемента.
Алит	Фаза портландцементного клинкера. Твердый раствор, матрицей которого является трехкальциевый силикат $C_3S$ . Кристаллизуется в виде призматических и гексагональных кристаллов размером 40 – 60 мкм. Основной носитель вяжущих свойств цемента.
Белит	Фаза портландцементного клинкера. Твердый раствор, матрицей которого является двухкальциевый силикат $C_2S$ . Кристаллы имеют округлую форму с размером в поперечнике 20 – 50 мкм. Отличается медленным твердением, вносит вклад в упрочнение цементного камня при длительном твердении.
Алюминаты кальция	Фаза портландцементного клинкера. Характеризуются составом $C_3A$ . Быстро гидратируется, активно участвует в процессах схватывания и раннего твердения.
Алюмоферриты кальция	Фаза портландцементного клинкера. Твердые многокомпонентные растворы ряда $C_8A_3F - C_2F$ , обозначают формулой $C_4AF$ . Характеризуется замедленным твердением в ранние сроки, в последующем способствует достижению высокой прочности.
Фазовый состав портландцементного клинкера	Алит 40 – 65%; белит 15 – 35%; алюминаты кальция (трехкальциевый алюминат) 4 – 12%; алюмоферриты кальция 10 – 18%. Могут присутствовать свободные, не вступившие в химическое взаимодействие $CaO$ (до 1%) и $MgO$ (до 5%).
Мокрый способ производства портландцемента	Предполагает измельчение сырьевой смеси с добавлением 30 – 45 % воды. В результате образуется суспензия – сырьевой шлам.
Сухой способ производства	Предполагает подготовку сырьевой смеси в виде сухого тонкомолотого порошка – сырьевой муки

портландцемента	(влажность не более 1%).
Полное ложное схватывание цементного теста	Полная, но обратимая потеря подвижности цементного теста вскоре после затворения. Основная причина: дегидратация двуводного гипса, вызванная повышением температуры цемента при помоле.
Контракция цементного теста	Химическая усушка (сжатие, стяжка); процесс уменьшения абсолютного объема системы «цемент-вода» вследствие гидратации.
Водоотделение цементного теста	Расслоение цементного теста в результате седиментации (осаждения) твердых частиц.
Цементный камень	Высокогетерогенная система, состоящая из твердой фазы, жидкой фазы (тонкораспределенной воды) и пор, заполненных воздухом или водой. Твердая фаза представлена продуктами гидратации и непрогидратированными остатками цемента.
Гидросиликаты кальция (ГСК)	Условный состав $C_xS_yH_n$ . Образованы при гидратации алита и белита. Составляют около 75% объема гидратов. Характеризуются переменным составом, различной структурой и степенью закристаллизованности.
Основность ГСК	Отношение $CaO:SiO_2$ , для низкоосновных ГСК 0,8 – 1,5; для высокоосновных ГСК 1,5 – 2,0.
Этtringит	Гидросульфат алюмината кальция. $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ . Образуется при гидратации алюминатной фазы в присутствии двуводного гипса. Если образуется в уже затвердевшем цементном камне (запоздалое формирование), то возникают сильные напряжения и наблюдаются деформации, приводящие к снижению прочности или разрушению структуры.
Усадка цементного камня	Уменьшение объема и массы при высыхании. Наблюдается при длительно пребывании в воздушной среде, относительная влажность которой ниже влажности цементного камня. Составляет 3 – 5 мм/м (или 0,3 – 0,5%).
Коррозия цементного первого вида	Возникает под действием пресных вод при фильтрации, при непрерывном омывании. При этом $Ca(OH)_2$ растворяется в воде и выносится из цементного камня. Увеличение пористости, ослабление структуры камня.

Коррозия цементного второго вида	Вызывают кислые воды. Агрессивность определяют по величине рН. Считают, что условия при значениях рН, меньших 6,5, опасны для цементного бетона. Увеличение пористости, капилляров в структуре за счет вымывания <i>легкорастворимых</i> продуктов реакции между $\text{Ca}(\text{OH})_2$ цементного камня и растворенным в воде веществом.
Коррозия цементного третьего вида	Возникает под влиянием морской или засоленной грунтовой воды. Наблюдается образование трещин и разрушение цементного камня за счет кристаллизации и накопления в порах камня труднорастворимых солей, отличающихся большим объемом, чем исходные составляющие цементного камня.
Активность цемента	Значение предела прочности при сжатии (МПа) образцов, установленное стандартным способом в возрасте 28 сут (например, 42,0 МПа, 54,3 МПа).
Марка цемента	Стандартный показатель, к которому условно приравнивают активность цемента. Марка – безразмерная величина, обозначаемая числом (например, 400; 500). Определяют по значениям пределов прочности при изгибе и сжатии стандартных образцов размером $40 \times 40 \times 160$ мм, изготовленных из цементно-песчаного раствора состава 1:3 нормальной консистенции после необходимого срока твердения в стандартных условиях.
Быстротвердеющий цемент	Интенсивно твердеет в начальный период: нормируемая прочность в возрасте 3 и 28 сут.
Сульфатостойкие цементы	Устойчивы к агрессивному действию сульфатных вод. Виды: сульфатостойкий портландцемент, сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками, сульфатостойкий шлакопортландцемент, пуццолановый портландцемент.
Пластифицированный портландцемент	Содержит пластифицирующую добавку (сульфитно-дрожжевая бражка и др.) до 0,3% , которая обеспечивает повышенную подвижность цементного теста при равных В/Ц.
Гидрофобный портландцемент	Содержит гидрофобизирующую добавку (асидол, мылонафт) до 0,3%, которая обеспечивает

	пониженную гигроскопичность при хранении и транспортировке (не впитывает воду в течение 5 мин).
Пуццолановый портландцемент	Продукт совместного помола (или тщательного смешения молотых компонентов) портландцементного клинкера <i>нормированного</i> состава, двуводного гипса и кислой АМД. Цементный клинкер содержит не более 8 % $C_3A$ .
Известково-пуццолановые вяжущие	Получают совместным помолом (или тщательным смешением) компонентов: известь (негашеная или гашеная; воздушная или гидравлическая) – 15 – 30%; двуводный гипс – 5%; ПЦ – 15 – 25% (вводят иногда доля ускорения твердения, повышения прочности камня), АМД – остальное.
Гипсоцементно-пуццолановые вяжущие	Получают путем тщательного смешения компонентов, %: гипсовое вяжущее 50 – 65; портландцемент 20 – 25; активная минеральная добавка 15 – 25.
Шлакопортландцемент	Продукт совместного помола (или тщательного смешения) портландцементного клинкера, двуводного гипса и шлаков (21 – 80 %; зачастую до 60 %).
Известково-шлаковые вяжущие	Получают совместным помолом (смешением) шлака (65 – 85 %), извести негашеной или гидратной (10 – 30 %), двуводного гипса (5%).
Шлакощелочные вяжущие	Получают затворением тонкомолотого шлака (удельная поверхность не менее 300 м <sup>2</sup> /кг) водным раствором едкой щелочи (например, жидкое стекло плотностью 1,2 – 1,3 г/м <sup>3</sup> ). Щелочной компонент составляет 5 – 15% массы шлака (на сухое вещество).
Глиноземистый цемент	Быстротвердеющее высокопрочное вяжущее, получаемое тонким помолом глиноземистого шлака или глиноземистого клинкера. Сырьевая смесь состоит из кальцийсодержащего (известняк, мел) и глиноземсодержащего (бокситы; материалы с повышенным содержанием $Al_2O_3$ ) компонентов. Фазовый состав, %: $CA$ 30 – 80; $C_{12}A_7$ 20 – 30; $CA_2$ 40 – 50; $C_2S$ 10 – 30; $C_2AS$ 10 – 15; $MA$ до 5.
Расширяющиеся цементы	При твердении происходит увеличение размера изделий. Расширение связано с увеличением объема твердой фазы, образовавшейся при

	гидратации цемента.
Напрягающий цемент (НЦ)	Разновидность расширяющегося цемента с нормированной величиной линейного расширения. Быстротвердеющее вяжущее сульфоалюминатного расширения.
Растворимое стекло (силикат – глыба)	Воздушное вяжущее вещество. Твердые стекловидные водорастворимые силикаты натрия и калия. Бесформенные однородные прозрачные куски; цвет зависит от примесей. Основа для жидкого стекла.
Жидкое стекло	Водные щелочные растворы силикатов натрия и калия. Вязкая прозрачная жидкость с содержанием 50 – 70 % воды. Плотность 1,35 – 1,5 г/см <sup>3</sup> .
Кислотоупорный цемент	Устойчив к действию большинства органических и минеральных кислот (кроме фтористоводородная, кремнефтористоводородная). Тонкомолотая смесь из кремнеземистого компонента (кварцевый песок, гранит, андезит, базальт, фарфор) – 10 мас. ч. и ускорителя твердения (кремнефтористого натрия) – 1 мас.ч. Тонкомолотую массу затворяют жидким стеклом плотность 1,3 – 1,4 г/см <sup>3</sup> .
Смешанные (композиционные) вяжущие вещества	Продукт совместного помола компонентов, один из которых имеет ярко выраженные вяжущие свойства и способен активизировать участие в структурообразовании остальных компонентов композиции. Эффективна механохимическая активация, введение химических модификаторов.
Вяжущие низкой водопотребности (ВНВ)	Продукт совместного тонкого помола портландцемента (30 – 100 %), органического модификатора (1– 3 %, сверх 100 %) и возможно минеральных добавок (0 – 70%).
Наноцемент	Продукт измельчения, совмещенного с механохимической активацией портландцементного клинкера и полимерного модификатора с минеральными добавками, до оптимального уровня дисперсий 400 – 600 м <sup>2</sup> /кг.

### 3.19 Контрольные вопросы

1. Вяжущие вещества: понятие, назначение, классификация.
2. Основные этапы технологии получения вяжущих веществ: перечень и назначение.
3. Основные этапы производства портландцемента.
4. Портландцемент: понятие, вещественный состав, марки.
5. Портландцементный клинкер: понятие, химический фазовый состав.
6. Разновидности портландцемента.
7. Активная минеральная добавка: назначение, виды, цементы с добавками.
8. Свойства цементного теста.
9. Состав и структура цементного камня.
10. Основные свойства цементного камня: перечень, характеристика, факторы влияния на долговечность.



## РАЗДЕЛ 4. БЕТОНЫ

### 4.1 Общие сведения

Бетон – искусственный каменный материал, получаемый в результате формования и затвердевания бетонной смеси.

Бетонной смесью называют перемешанную до однородного состояния массу, состоящую из вяжущего вещества, воды (или другого затворителя), заполнителей и специальных добавок, взятых в расчетных соотношениях.

Состав бетонной смеси подбирают таким образом, чтобы при данных условиях укладки и твердения бетон обладал требуемыми свойствами (прочность, морозостойкость и другие).

Основные преимущества бетона:

- обширная сырьевая база; использование техногенных ресурсов;
- возможность гибкого регулирования состава, структуры и свойств в широком интервале;
- универсальная формуемость;
- многообразие изделий и их конфигураций;
- простота технологии изготовления;
- высокие технические характеристики;
- долговечность;
- экологическая безопасность;
- возможность использования для защиты окружающей среды.

Бетон – основной материал современного строительства. Бетон широко используют в жилищном, промышленном, транспортном, гидротехническом, энергетическом и других видах строительства.

### 4.2 Классификация бетонов

Бетоны классифицируют по ряду признаков: по средней плотности, структуре, виду вяжущего вещества, технологическим особенностям и назначению.

Средняя плотность бетонов.

Многие свойства бетона зависят от средней плотности, на величину которой влияют плотность цементного камня, вид заполнителя и структура бетонов.

Различают бетоны:

- особо тяжелые – более 2500 кг/м<sup>3</sup>;
- тяжелые – 1800 – 2500 кг/м<sup>3</sup>;
- легкие – 600 – 1800 кг/м<sup>3</sup>;
- особо легкие – менее 600 кг/м<sup>3</sup>.

Особо тяжелые бетоны изготавливают на заполнителях с высокой плотностью – стальных опилках или стружках (сталебетон), железной руде (лимонитовый и магнетитовый бетоны) или барите (баритовый бетон).

Тяжелые бетоны получают при использовании плотных заполнителей из горных пород (гранит, известняк, диабаз).

Легкие бетоны изготавливают на пористых заполнителях (керамзит, аглопорит, вспученный шлак, пемза, туф). Применение легких бетонов уменьшает массу строительных конструкций.

Особо легкие бетоны получают при использовании высокопористых заполнителей (например, силипор, пенополистирол и другие), при поризации цементного камня (поризованные бетоны на пористых заполнителях, ячеистые бетоны, крупнопористые бетоны на легких заполнителях).

Структура бетонов.

Структура – главная характеристика бетонов, которая определяет все свойства материала.

По структуре различают бетоны (рисунки 4.1 и 4.2):

– крупнозернистый бетон плотной (слитной) структуры на плотном заполнителе (например, с использованием гранитного щебня и кварцевого песка);

– мелкозернистый бетон плотной (слитной) структуры на плотном заполнителе (без крупного заполнителя; размер частиц заполнителя не более 10 мм);

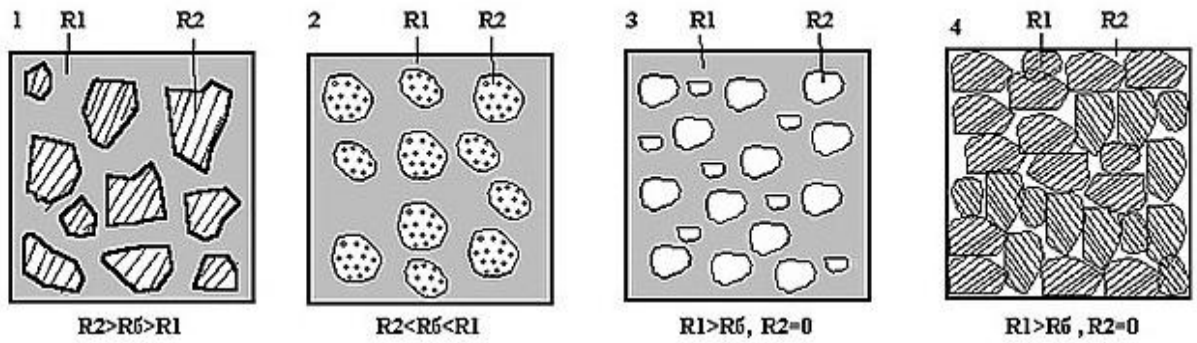
– крупнозернистый бетон плотной (слитной) структуры на пористом заполнителе (например, с использованием керамзита);

– мелкозернистый бетон плотной (слитной) структуры на пористом заполнителе (например, с использованием керамзитового песка, гранулированного пеностекла);

– крупнозернистый бетон поризованной структуры на пористом заполнителе (например, с использованием керамзита и поризацией цементного камня);

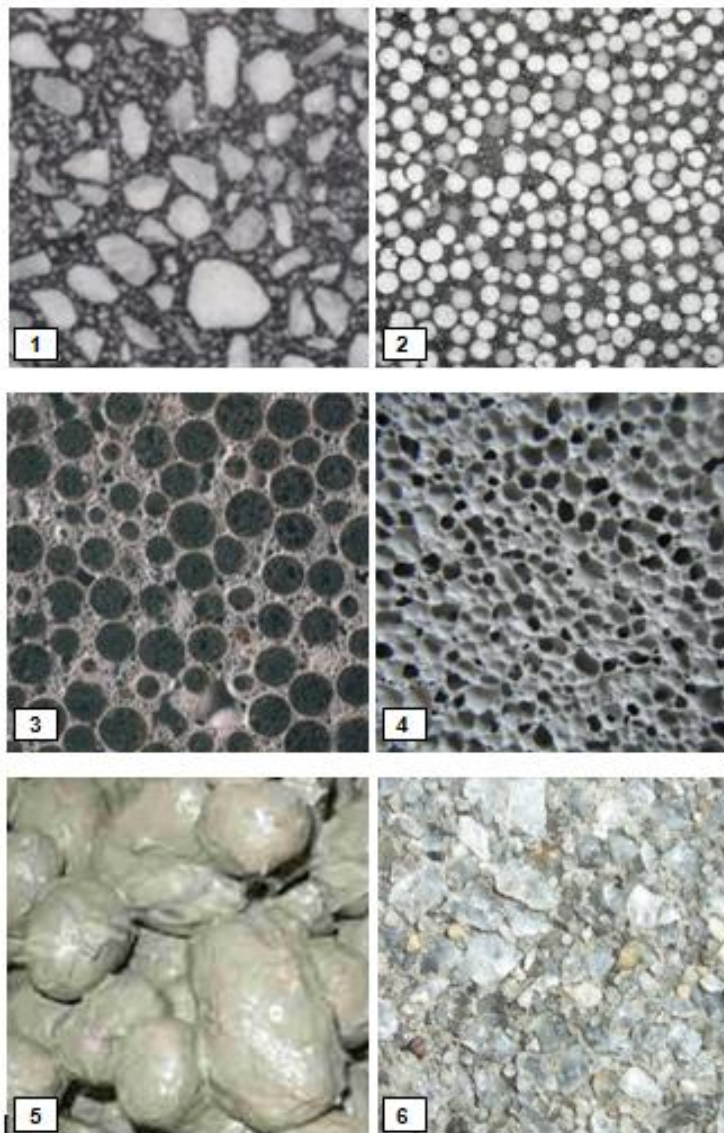
– ячеистый бетон, который не содержит заполнителей и представлен поризованным цементным камнем (например, газобетон, пенобетон);

– крупнопористый бетон на пористом заполнителе, в котором частицы заполнителя окружены тонким слоем цементного камня, который скрепляет заполнитель в местах контакта; пространство между зернами заполнителя пусто, образуя крупные поры.



- 1 – бетон плотной структуры на плотном заполнителе;
- 2 – бетон плотной структуры на пористом заполнителе;
- 3 – бетон ячеистой структуры;
- 4 – бетон крупнопористой структуры.

Рисунок 4.1 – Основные типы структур бетона



- 1 – тяжелый бетон (плотной структуры на плотном заполнителе);
- 2 – легкий бетон (плотной структуры на пористом заполнителе);
- 3 – легкий бетон (поризованной структуры на пористом заполнителе);
- 4 – ячеистый бетон;
- 5 – крупнопористый бетон;
- 6 – мелкозернистый бетон (плотной структуры на плотном заполнителе).

Рисунок 4.2 – Бетоны различной структуры

Вид вяжущего в составе бетонов.

- цементные;
- силикатные (известково-кремнеземистое вяжущее, твердение в автоклаве);
- гипсовые;
- магнезиальные;
- шлакощелочные;
- полимерцементные;
- полимербетоны;
- асфальтобетоны;
- специальные.

Технология изготовления бетонов.

В зависимости от технологии изготовления различают бетоны:

- из жестких бетонных смесей для немедленной распалубки изделий;
- литые бетоны для изготовления изделий и конструкций способом литья;
- безусадочные;
- быстротвердеющие;
- пропаренные (твердеют при тепловлажностной обработке при 80 – 100°C);
- автоклавные (твердеют при 170 – 200°C и давлении пара 0,7–1,3 МПа);
- бетоны для зимнего бетонирования, твердеющие при отрицательных температурах (бетоны для монолитного строительства).

Область применения бетонов.

В зависимости от области применения различают:

- обычный бетон для железобетонных конструкций (фундаментов, колонн, балок, перекрытий, мостовых и других типов конструкций);
- гидротехнический бетон для плотин, шлюзов, облицовки каналов, водопроводно-канализационных сооружений;
- бетон для ограждающих конструкций (легкий);
- дорожный бетон для тротуаров, дорожных и аэродромных покрытий;
- бетоны специального назначения, например, жароупорный, кислотостойкий, для радиационной защиты и другие.

### **4.3 Материалы для бетонов**

Для бетона строительных конструкций наиболее широко используют неорганические вяжущие вещества. Эти вещества при смешивании с водой под влиянием внутренних физико-химических процессов способны схватываться (переходить из жидкого или тестообразного состояния в камневидное тело) и твердеть. Назначение вяжущего вещества – соединить, лишить возможности перемещения частицы заполнителя, скрепляя их в монолит. Основные характеристики вяжущего, определяющие свойства бетона: вещественный и фазовый состав, тонкость помола,

нормальная густота, сроки схватывания, тепловыделение при гидратации, прочностные показатели.

Для получения высококачественных бетонов и повышения эффективности использования цемента в бетоне применяют композиционные вяжущие вещества. В этих материалах к основному вяжущему компоненту добавляют специальные добавки и активные минеральные компоненты, в том числе обладающие вяжущими свойствами. При этом добиваются как существенного улучшения реологических свойств цементного теста, так и прочности и других свойств.

Заполнители занимают в бетоне до 80 % объема и оказывают влияние на свойства бетона, его долговечность и стоимость. Введение в бетон заполнителей позволяет резко сократить расход цемента, являющегося наиболее дорогим и дефицитным компонентом. Кроме того, заполнители улучшают технические свойства бетона. Жесткий скелет из высокопрочного заполнителя несколько увеличивает прочность и модуль деформации бетона, уменьшает деформации конструкций под нагрузкой, а также ползучесть бетона – необратимые деформации, возникающие при длительном действии нагрузки. Заполнитель уменьшает усадку бетона, способствуя получению более долговечного материала. Усадка цементного камня при его твердении достигает 1 – 2 мм/м. В результате неравномерности усадочных деформаций возникают внутренние напряжения и даже микротрещины. Заполнитель воспринимает усадочные напряжения и в несколько раз уменьшает усадку бетона по сравнению с усадкой цементного камня.

Пористые естественные и искусственные заполнители, обладая малой плотностью, уменьшают плотность легкого бетона, улучшают его теплотехнические свойства. В специальных бетонах (жаростойких, для защиты от радиации) роль заполнителя очень высока, так как его свойства во многом определяют специальные свойства этих бетонов.

Стоимость заполнителя составляет 30 – 50% (а иногда и более) от стоимости бетонных и железобетонных конструкций, поэтому применение более доступных и дешевых местных заполнителей в ряде случаев позволяет снизить стоимость строительства, уменьшает объем транспортных перевозок, обеспечивает сокращение сроков строительства.

Правильный выбор и разумное использование заполнителей для бетона – одна из важных задач технологии бетона.

В бетоне применяют крупный и мелкий заполнитель. Крупный заполнитель (более 5 мм) подразделяют на гравий и щебень. Мелким заполнителем в бетоне является естественный или искусственный песок.

К заполнителям для бетона предъявляются требования, учитывающие особенности влияния заполнителя на свойства бетона. Заполнитель представляет собой совокупность отдельных зерен, т. е. является зернистым материалом, для которого имеется ряд общих закономерностей. Наиболее существенное влияние на свойства бетона оказывают зерновой состав, прочность и чистота заполнителя.

Существует много предложений по назначению оптимального зернового состава заполнителя. Большинство исследователей считают более эффективным непрерывный зерновой состав заполнителей, так как хотя смеси с прерывистым составом при исключении фракций средних размеров и обеспечивают меньшую пустотность смеси, однако в них подвижность мелких зерен, защемленных между крупными, ограничена и для получения определенной подвижности бетонной смеси толщина обмазки зерен цементным тестом должна быть более толстой, чем в смесях с непрерывным зерновым составом. Причем это происходит в условиях, когда возрастает объем мелкой фракции и удельная поверхность заполнителя. В результате увеличивается расход цемента на обмазку зерен и уменьшается возможность экономии цемента за счет уменьшения пустотности заполнителя. Кроме того, смеси с прерывистым зерновым составом склонны к расслоению, что отрицательно сказывается на однородности бетона.

Для выбора непрерывного зернового состава заполнителя предлагались различные «идеальные» кривые просеивания. Поскольку нельзя получить смесь одновременно с минимальным объемом пустот и наименьшей удельной поверхностью зерен (ибо минимизацию можно проводить только по одному фактору), идеальная кривая подбирается из условия, чтобы количество пустот в смеси и суммарная поверхность зерен требовали минимального расхода цемента для получения определенной подвижности бетонной смеси и прочности плотного бетона. При подборе соотношения зерен различных размеров по идеальной кривой получаются наиболее подвижные смеси при одном и том же расходе цемента, менее склонные к расслаиванию.

В действительности наиболее и наименее плотные укладки маловероятны и практически будет иметь место какая-то промежуточная система укладки и, следовательно, средняя пустотность, определяемая степенью уплотнения. С увеличением угловатости зерен вероятные значения пустотности возрастают. Особенно же увеличивается пустотность при применении зерен удлиненной формы (игольчатых, лещадных).

Если заполнитель представляет собой смесь зерен разной формы, то с увеличением в ней зерен окатанной формы пустотность уменьшается. При совмещении зерен разной крупности более мелкие зерна будут располагаться в пустоте между более крупными и пустотность заполнителя уменьшается.

Если зерна смешиваемых фракций не очень отличаются размером, то размер мелких зерен окажется больше, чем размер пустот между крупными зернами, и мелкие зерна, не уместаясь в пустотах, несколько раздвинут крупный заполнитель. В результате пустотность всей системы может не только уменьшиться, но даже увеличиться. Для получения наиболее плотной смеси двух фракций необходимо, чтобы размер зерен одной фракции был приблизительно в 6,5 раза меньше размера зерен другой фракции (смешивание крупного заполнителя с песком). Однако большее распространение получили заполнители с непрерывным зерновым

составом, хотя и имеющие несколько повышенную пустотность, но менее склонные к расслоению и чаще встречающиеся на практике.

Пустотность заполнителей колеблется от 20 до 50 %. В бетоне желательно использовать заполнители, состоящие из нескольких фракций и имеющие наименьшую пустотность.

Прочность заполнителя определяется не только прочностью горной породы, из которой он получен, но и крупностью зерен. При выветривании или дроблении породы разрушение происходит по более слабым местам структуры и с уменьшением размера зерен прочность их как бы повышается. Прочность бетона на гранитном щебне несколько выше прочности раствора. При применении менее прочного крупного заполнителя прочность бетона при увеличении прочности раствора возрастает лишь до определенных значений и дальнейшее повышение прочности раствора не приводит к повышению прочности бетона. Предельно достижимая прочность бетона тем ниже, чем меньше прочность крупного заполнителя, причем ее значение зависит также и от содержания заполнителя, постепенно увеличиваясь с уменьшением его количества. Влияние крупного заполнителя на прочность бетона приходится учитывать при проектировании составов легкого бетона на пористых заполнителях. В этом случае для получения соответствующей плотности в бетон вводят легкий пористый заполнитель.

Большое влияние на прочность бетона оказывает чистота заполнителя. Пылевидные и особенно глинистые примеси создают на поверхности зерен заполнителя пленку, препятствующую сцеплению их с цементным камнем. В результате прочность бетона понижается иногда на 30 – 40%.

Воду используют для затворения вяжущего при приготовлении бетонной смеси. Пригодна водопроводная питьевая, любая вода, имеющая водородный показатель рН не менее 4: не кислая, не окрашивающая лакмусовую бумагу в красный цвет. Вода не должна содержать сульфатов более 2700 мг/л (в пересчете на SO<sub>4</sub>) и всех солей более 5000 мг/л. В сомнительных случаях пригодность воды для приготовления бетонной смеси необходимо проверять путем сравнительных испытаний образцов, изготовленных на данной воде и на обычной водопроводной.

Для приготовления бетонной смеси можно применять морскую и другие соленые воды, удовлетворяющие приведенным выше условиям. Исключением является бетонирование внутренних конструкций жилых и общественных зданий и надводных железобетонных сооружений в жарком и сухом климате, так как морские соли могут выступить на поверхности бетона, а также вызвать коррозию стальной арматуры.

Для регулирования свойств бетона, бетонной смеси и экономии цемента применяют различные добавки:

– химические добавки, вводимые в бетон в небольшом количестве (0,1 – 2% массы цемента) и изменяющие в нужном направлении свойства бетонной смеси и бетона;



–тонкомолотые добавки (5 – 20% и более), используемые для экономии цемента, получения плотного бетона при малых расходах цемента и повышения стойкости бетона.

Применение химических добавок является одним из наиболее универсальных, доступных и гибких способов управления технологией бетона и регулирования его свойств. Если ранее наиболее широко в строительстве использовались в виде добавок отдельные химические продукты и модифицированные отходы промышленности, то в настоящее время преобладают добавки, специально приготовленные для бетона (суперпластификаторы, органоминеральные и другие).

Химические добавки классифицируют по основному эффекту действия:

– регулирующие свойства бетонных смесей: пластифицирующие – увеличивающие подвижность бетонной смеси; стабилизирующие, т.е. предупреждающие расслоение бетонной смеси; водоудерживающие, уменьшающие водоотделение;

–регулирующие схватывание бетонных смесей и твердение бетона: ускоряющие или замедляющие схватывание, ускоряющие твердение, обеспечивающие твердение при отрицательных температурах (противоморозные);

– регулирующие плотность и пористость бетонной смеси и бетона: воздухововлекающие, газообразующие, пенообразующие, уплотняющие (воздухоудаляющие и кольматирующие поры бетона);

– регуляторы деформаций бетона, расширяющие добавки;

– повышающие защитные свойства бетона к стали, ингибиторы коррозии стали;

– стабилизаторы, повышающие стойкость бетонных смесей против расслоения, снижающие раство- и водоотделение;

– придающие бетону специальные свойства: гидрофобизирующие – уменьшающие смачивание бетона; антикоррозионные – повышающие стойкость в агрессивных средах, красящие, повышающие бактерицидные и инсектицидные свойства, электроизоляционные, электропроводящие, противорадиационные.

Некоторые добавки обладают полифункциональным действием, например, пластифицирующие и воздухововлекающие, газообразующие и пластифицирующие и другие. В этом случае добавку классифицируют по наиболее выраженному эффекту действия.

Минеральные добавки. Для активного управления структурой и свойствами бетонной смеси и бетона, наряду с химическими добавками применяют минеральные (МД). Эти материалы представляют собой порошки различной минеральной природы, получаемые из природного или техногенного сырья (золы, молотые шлаки и горные породы, микрокремнезем). Минеральные добавки отличаются от заполнителя мелкими размерами зёрен (менее 0,16 мм, а чаще еще меньше), а от химических модификаторов тем, что они не растворяются в воде, являясь по

существованию тонкой составляющей твердой фазы бетона. Располагаясь вместе с цементом в пустотах заполнителя, они уплотняют структуру бетона, в ряде случаев позволяют уменьшить расход цемента. Поэтому МД часто называют минеральными на-полнителями. Минеральные добавки делятся на активные и инертные. Активные МД способны в присутствии воды взаимодействовать с диоксидом кальция при обычных температурах, образуя соединения, обладающие вяжущими свойствами. При введении в бетон они взаимодействуют с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , выделяющимся при гидратации портландцемента. Некоторые активные МД, например, молотые доменные шлаки, способны к самостоятельному твердению, которое активизируется при добавке извести. На свойства минеральных добавок значительное влияние оказывает их зерновой состав, определяющий удельную поверхность и соответственно реакционную способность или возможность уплотнения структуры бетона.

Использование добавок в технологии бетона требует дополнительных затрат для создания складов добавок, транспортных магистралей, узлов подготовки добавок, дополнительных дозаторов на бетоносмесительных цехах и заводах. Некоторые добавки имеют сравнительно высокую стоимость и еще дефицитны. Поэтому необходимо использовать добавки в первую очередь там, где их применение дает наибольший технико-экономический эффект.

#### **4.4 Бетонная смесь**

Бетонная смесь – рационально подобранная и тщательно перемешанная смесь вяжущего, заполнителей, затворителя и добавок до ее формирования и начала процессов твердения.

Для получения изделий высокого качества бетонная смесь должна обладать такими свойствами, чтобы ее можно было при принятой технологии производства транспортировать, укладывать и уплотнять с минимальными затратами труда, без расслоения. Бетонная смесь должна в установленные сроки обеспечивать получение бетона с заданными техническими характеристиками.

Удобоукладываемость – способность бетонной смеси заполнять форму бетонируемого изделия и уплотняться в ней под действием силы тяжести или внешних механических воздействий.

Удобоукладываемость должна соответствовать выбранному способу уплотнения. Это обеспечит плотную укладку бетонной смеси и, следовательно, высокую прочность и долговечность изделий.

Удобоукладываемость бетонной смеси оценивают по показателям подвижности и жесткости. По удобоукладываемости бетонные смеси делят по ГОСТ 7473 – 94 на марки (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Классификация бетонных смесей по удобоукладываемости

Марка бетонной смеси по удобоукладываемости	Норма удобоукладываемости по показателю		
	жесткости, с	подвижности, см	
		осадка конуса	расплыв конуса
Сверхжесткие смеси			
СЖ3	Более 100	–	–
СЖ2	51 – 100	–	–
СЖ1	50 и менее	–	–
Жесткие смеси			
Ж4	31 – 60	–	–
Ж3	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

Условно выделяют подвижные и жесткие бетонные смеси, которые отличаются внешним видом, составом, строением, назначением.

Подвижная бетонная смесь – пластичная масса, характеризующаяся сплошностью строения. Заполнители в смеси находятся как бы во взвешенном состоянии и в сплошной среде цементного теста. Бетонная смесь легко меняет форму, но не допускает изменения объема при уплотнении. Подвижность оценивают по осадке конуса (ОК).

При ОК = 2 – 4 см смесь – малоподвижная, ОК = 4 – 12 см – подвижная, ОК = 12 см – литая (текучая). При ОК = 0 бетонная смесь – жесткая.

Жесткая бетонная смесь – рыхлая масса, состоящая из отдельных агрегатов зерен заполнителя, сцепленных между густым цементным тестом. Для уплотнения смеси необходимо механическое воздействие. В процессе уплотнения смесь уменьшает первоначально занимаемый объем.

К особо жестким относят смеси при времени вибрации 13 с и более; к жестким 5 – 12 с, к малоподвижным – менее 5 с. В отличие от подвижных жесткие бетонные смеси отличаются повышенной стабильностью и почти не склонны к расслаиванию. Между частицами бетонной смеси действует большая сила трения. Выбор типа бетонной смеси зависит от технологии их приготовления и формования; от конфигурации и габаритов изделия; от степени насыщения изделий арматурой.

Выбор типа бетонной смеси зависит от технологии их приготовления и формования; от конфигурации и габаритов изделия; от степени насыщения изделий арматурой.

Подвижность бетонной смеси характеризуется осадкой конуса (ОК), отформованного из бетонной смеси. ОК измеряют в см.

При наибольшей крупности зерен заполнителя до 40 мм подвижность определяют на стандартном конусе Абрамса (рисунок 4.3).

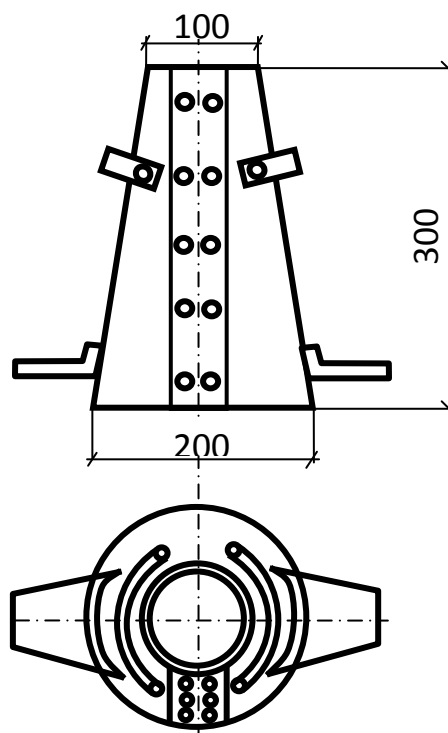


Рисунок 4.3 – Стандартный конус для определения подвижности бетонной смеси

Применение заполнителя с размером зерен, превышающим 40 мм, требует использования увеличенного конуса с размерами, мм: внутренний диаметр нижнего основания 300, верхнего основания – 150, высота – 450. Величину ОК бетонной смеси, определенную на увеличенном конусе, умножают на поправочный коэффициент 0,67 (для приведения к стандартному результату).

Стандартный конус (рисунок 4.3) представляет собой металлическую форму без дна в виде усеченного конуса. В комплект с конусом входит металлический стержень диаметром 16 мм, длиной 600 мм с округленными концами.

Для подготовки прибора к испытаниям все соприкасающиеся с бетонной смесью поверхности следует очистить и протереть влажной тканью. Конус устанавливают на плоскую горизонтальную поверхность, не впитывающую влагу (например, металлический лист или кусок линолеума).

На конус надевают воронку, заполняют бетонной смесью до уровня, равного 1/3 высоты, и уплотняют 25 – кратным штыкованием металлическим стержнем. Затем конус заполняют до 2/3 высоты и вновь штыкуют 25 раз. Далее конус заполняют с избытком и опять штыкуют 25 раз. Штыкование

производят равномерно от стенок к центру конуса. Во время штыкования конус должен быть прижат к основанию.

После уплотнения последнего слоя воронку снимают, избыток бетонной смеси срезают, поверхность заглаживают. Затем металлический конус строго вертикально снимают и устанавливают рядом с бетонным конусом. Время, затраченное на подъем, составляет 3 – 7 с.

Освобожденная от формы – конуса бетонная смесь под действием собственной массы начинает оседать. После окончания осадки на верхнее основание формы – конуса укладывают металлическую или деревянную линейку, от нижнего ребра которой другой линейкой измеряют осадку бетонной смеси с точностью до 0,5 см (рисунок 4.4).

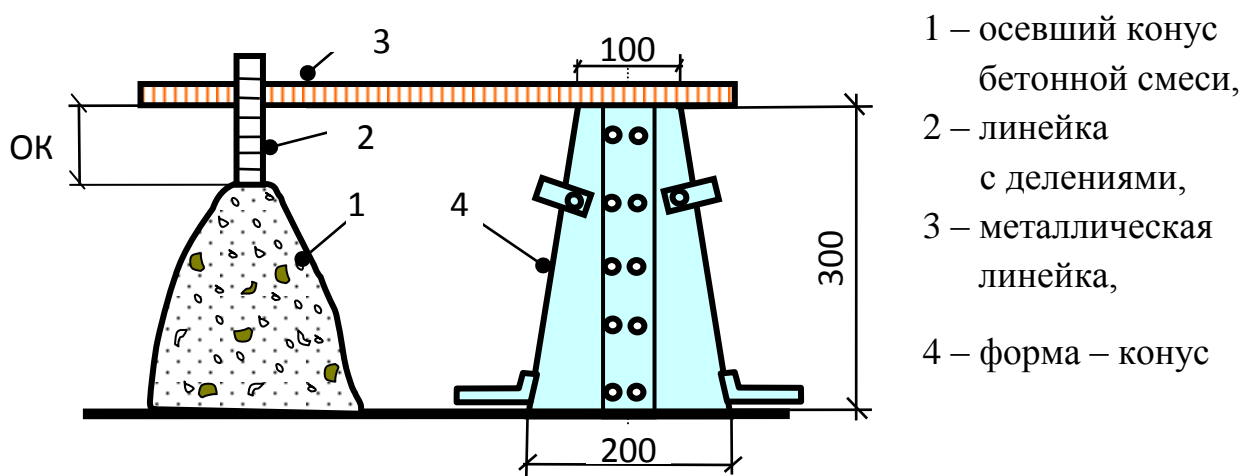


Рисунок 4.4 – Определение подвижности бетонной смеси стандартным конусом

Измерения производят два раза с одним и тем же замесом. Осадку конуса вычисляют как среднее арифметическое результатов двух определений с точностью до 1 см. При этом разница между двумя результатами не должна превышать 2 см (при  $ОК \leq 8$  см) и 3 см ( $ОК \geq 9$  см). В противном случае приготавливают новый замес и повторяют до получения необходимых результатов. Полученная величина ОК – характеризует подвижность бетонной смеси.

В тех случаях, когда после снятия конуса бетонная смесь разваливается и приобретает такую форму, которая затрудняет определение ОК, измерения не выполняют.

Время испытания с начала наполнения формы – конуса до момента измерения ОК бетонной смеси не должно превышать 10 мин.

Если при определении подвижности бетонной смеси ОК будет равно нулю, это означает, что смесь не обладает подвижностью. Показателем удобоукладываемости такой смеси считают жесткость.

Жесткость бетонной смеси оценивают временем, выраженным в секундах (с), которое необходимо для выравнивания и уплотнения

предварительно отформованного конуса бетонной смеси под влиянием вибрационного воздействия на специальном приборе.

Для определения жесткости допускается применение различных приборов. Для сопоставления показателей, полученных разными методами, со стандартными значениями применяют переходные коэффициенты.

Жесткость вычисляют как среднее арифметическое двух определений, раз-ница между которыми не превышает 20%. Расчет производят с точностью до 1 с. Общее время испытания с начала заполнения конуса бетонной смесью в установленном приборе в первом опыте и до окончания определения жесткости во втором опыте не должно превышать 15 мин. Жесткость выражают временем (с) от начала вибрации до указанного момента.

Стандартный прибор для определения жесткости (рисунок 4.5) состоит из формы – цилиндрического кольца, конуса и воронки, которые изготовлены из листовой стали, а также диска, штанги и шайбы. Общая масса диска, штанги и шайбы прибора должна составлять  $2750 + 50$  г. Перед испытанием кольцо и конус прибора очищают и протирают влажной тканью.

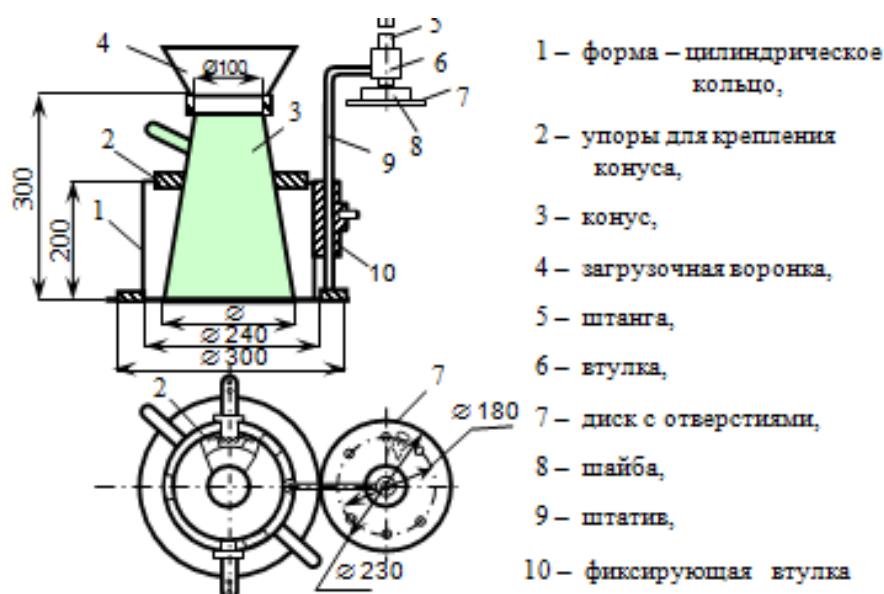


Рисунок 4.5 – Прибор для определения жесткости бетонной смеси

При определении жесткости бетонной смеси прибор устанавливают на виб-роплощадке и собирают в следующем порядке. Сначала жестко закрепляют ци-линдрическое кольцо, в которое вставляют конус и закрепляют ручками, заводя их в пазы кольца. После чего устанавливают воронку. Заполнение конуса прибора бетонной смесью, уплотнение смеси и снятие конуса с отформованной массы производят по методике, описанной для определения подвижности смеси. Затем поворотом штатива устанавливают диск на поверхности отформованного бетонного конуса. Штатив закрепляют в фиксирующей втулке зажимным винтом.

После чего одновременно включают виброплощадку и секундомер и вибрируют до тех пор, пока не начнется выделение цементного теста из двух любых отверстий диска. В этот момент выключают секундомер и виброплощадку.

Для бетонных смесей с максимальной крупностью зерен заполнителя до 40 мм жесткость определяют также на техническом вискозиметре (рисунок 4.6).

Прибор представляет собой цилиндрический сосуд, внутрь которого помещают цилиндрическое кольцо. К верхнему краю этого кольца прикреплены три планки, при помощи которых кольцо закрепляют на бортах сосуда в подвешенном состоянии на расстоянии 70 мм от дна сосуда. В комплекте прибора имеется усеченный металлический конус с воронкой. Частью прибора является штатив, прикрепленный к цилиндрическому сосуду. К штанге штатива прикреплен диск (масса диска со штативом 800 – 1000 г, толщина диска 3 мм).

Для определения жесткости бетонной смеси цилиндрический сосуд устанавливают и закрепляют на лабораторной виброплощадке (частота колебаний 3000 кол/мин, амплитуда 0,5 мм). Затем в сосуд вставляют кольцо и закрепляют его зажимами. В кольцо помещают стандартный конус без нижних планок. На конус устанавливают воронку. Порядок заполнения конуса бетонной смесью, ее уплотнение, снятие металлического конуса осуществляют аналогично описанному выше для определения подвижности бетонной смеси.

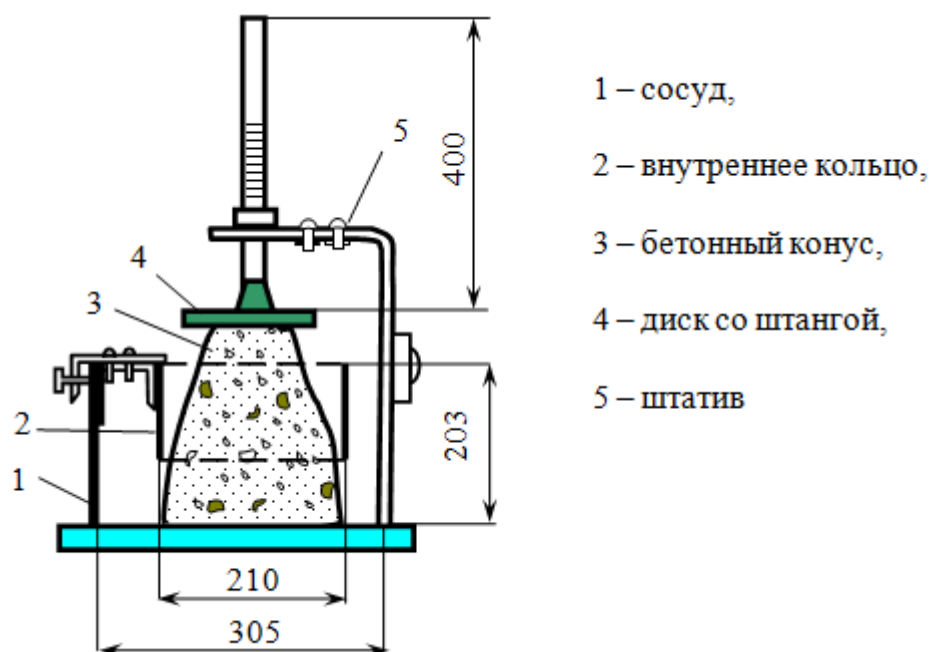


Рисунок 4.6 – Технический вискозиметр для определения жесткости бетонной смеси



Окончательное уплотнение смеси в конусе производится вибрированием до появления на поверхности цементного молока (5 – 30 с). Затем воронку снимают, и избыток смеси срезают и осторожно поднимают металлический конус в вертикальном положении. На приборе устанавливают штатив, направляющий движение диска. Освобождая зажимной винт, диск опускают на поверхность бетонного конуса. Одновременно включают виброплощадку и секундомер. Под действием вибрации бетонная смесь растекается, проникает в сосуд за внутреннее кольцо.

По мере распределения бетонной смеси в цилиндрическом сосуде металлический диск постепенно опускается вниз. Вибрирование производят до тех пор, пока риска штанги совпадают с верхней плоскостью направляющей головки штатива. В этот момент выключают секундомер и вибратор. Время от начала вибрации до указанного момента, выраженное в секундах и деленное на поправочный коэффициент 4, характеризует жесткость бетонной смеси.

Для бетонных смесей с максимальным размером зерен заполнитель до 70 мм и жесткости смеси до 100 с применяют упрощенный способ (метод Скрамтаева Б.Г.). Испытания проводят в формах для изготовления контрольных кубов с размером ребра 20 см. Форму закрепляют на виброплощадке. В форму вставляют металлический конус и заполняют его через воронку бетонной смесью (рисунок 4.7), которую уплотняют штыкованием (по выше описанной методике). Затем конус осторожно снимают и выключают одновременно виброплощадку и секундомер. Вибрирование продолжается до заполнения всех углов металлической формы и выравнивания ее поверхности.



Рисунок 4.7 – Упрощенный способ определения жесткости бетонной смеси

Время от начала вибрации до указанного момента, деленное на поправочный коэффициент 2, характеризует жесткость бетонной смеси.

## 4.5 Свойства бетона

Свойства бетона: физические, механические, деформационные и эксплуатационные (долговечность).

Физические свойства.

Высокая плотность структуры бетона достигается рациональным подбором зернового состава заполнителей (с минимальной пустотностью), применением бетонных смесей с низким водоцементным отношением, интенсивным уплотнением, введением в бетонную смесь добавок. Даже выполнение указанных мероприятий не дает возможности получить абсолютно плотный бетон. Поры в бетоне образуются в результате испарения воды, не вступившей в химическую реакцию с цементом при его твердении, а также вследствие неполного удаления воздушных пузырьков при уплотнении бетонной смеси. Поэтому бетон является материалом газопроницаемым.

Теплопроводность – наиболее важная теплофизическая характеристика бетона, в особенности применяемого в ограждающих конструкциях зданий; зависит от плотности материала. Теплопроводность тяжелого бетона в воздушно-сухом состоянии  $1,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ : в 2 – 4 раза больше, чем у легких бетонов (на пористых заполнителях и ячеистых). Высокая теплопроводность является недостатком тяжелого бетона. Панели наружных стен из тяжелого бетона изготавливают с внутренним слоем утеплителя. Теплоемкость тяжелого бетона изменяется в узких пределах –  $0,75 - 0,92 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Линейный коэффициент температурного расширения бетона составляет около  $0,00001 \text{ }^\circ\text{C}$ , следовательно, при увеличении температуры на  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  расширение достигает примерно  $0,5 \text{ мм}/\text{м}$ . Во избежание растрескивания сооружений большой, протяженности разрезают температурно-усадочными швами. Крупный заполнитель и раствор, составляющие бетон, имеют различный коэффициент температурного расширения и будут по – разному деформироваться при изменении температуры. Большие колебания температуры (более  $80^\circ\text{C}$ ) смогут вызвать внутреннее растрескивание бетона вследствие различного теплового расширения крупного заполнителя и раствора. Характерные трещины распространяются по поверхности заполнителя, некоторые из них образуются в растворе, а иногда и в слабых зернах заполнителя. Внутреннее растрескивание можно предотвратить, если позаботиться о подборе составляющих бетона с близкими коэффициентами температурного расширения

Водопроницаемость бетона характеризуется небольшим давлением воды, при котором она еще не просачивается через образец. Плотный бетон при мелкопористой структуре и достаточной толщине конструкции оказывается практически водонепроницаемым. Проектная марка бетона по водонепроницаемости характеризуется односторонним гидростатическим давлением ( $\text{кгс}/\text{см}^2$ ), при котором образцы бетона не пропускают воду в условиях стандартного испытания. Назначается для бетона, к которому предъявляются требования по плотности и водонепроницаемости. По

водонепроницаемости бетон делят на марки: W2, W4, W6, W8, W10 и W12, при котором образец-цилиндр высотой 15 см не пропускает воду в условиях стандартного испытания и выдерживает соответственно давление 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 и 1,2 МПа. В более тонких конструкциях добиваются высокой водонепроницаемости бетона использованием гидрофобного цемента, а также применением водоизоляционных покрытий, наносимых на поверхность пневматическим способом (торкретированием).

Механические свойства.

Прочность бетона. В конструкциях зданий и сооружений бетон может находиться в различных условиях работы, испытывая сжатие, растяжение, изгиб, скалывание. Прочность бетона при сжатии зависит от активности цемента, водоцементного отношения, качества заполнителей, степени уплотнения бетонной смеси и условий твердения. Основными факторами при этом оказываются активность цемента и водоцементное отношение (В/Ц).

Фактическая прочность цементного камня или других хрупких материалов, намного ниже теоретической прочности, установленной на основе молекулярного сцепления и вычисленной из энергии поверхности твердого вещества, предполагаемого совершенно однородным и без дефектов.

Для получения удобоукладываемой бетонной смеси отношение воды к цементу обычно принимают  $В/Ц = 0,4 - 0,7$ , для химического взаимодействия цемента с водой требуется не более 20% воды массы цемента. Избыточная вода, не вступившая в химическое взаимодействие с цементом, испаряется из бетона, образуя в нем поры, что ведет к снижению плотности и соответственно прочности бетона. Исходя из этого, прочность бетона можно повысить путем уменьшения водоцементного отношения и усиленного уплотнения.

Наряду с активностью и качеством цемента, водоцементным отношением и качеством заполнителей на прочность бетона в значительной степени влияют: степень уплотнения бетонной смеси, продолжительность и условия твердения бетона. Прочность заполнителей не оказывает значительного влияния на прочность бетона до тех пор, пока она больше проектируемой марки бетона. Применение низкопрочных заполнителей с прочностью ниже требуемой марки бетона может снизить прочность последнего или потребует высокого расхода цемента.

Шероховатость поверхности заполнителей также оказывает влияние на прочность бетона. В отличие от гравия зерна щебня имеют развитую шероховатую поверхность, чем обеспечивается лучшее сцепление с цементным камнем, а бетон, приготовленный на щебне при прочих равных условиях, имеет большую прочность, чем бетон на гравии.

Качество бетона по прочности характеризуется его классом (маркой).

За проектную марку бетона по прочности на осевое растяжение принимают сопротивление осевому растяжению контрольных образцов. Эта марка назначается тогда, когда она имеет главенствующее значение.

За проектную марку бетона по прочности на сжатие принимают сопротивление осевому сжатию эталонных образцов-кубов. Определяется величиной предела прочности при сжатии образцов-кубов с ребром 150 мм, изготовленных из рабочей бетонной смеси после твердения их в течение 28 сут в нормальных условиях (МПа). Бетон должен быть однородным – это важнейшее техническое и экономическое требование. Для оценки однородности бетона данной марки используют результаты контрольных испытаний бетонных образцов за определенный период времени, имеется в виду, что стандартные образцы твердели в одинаковых условиях одно и то же время. Прочность бетонных образцов будет колебаться, отклоняясь от среднего значения в большую и меньшую стороны. На прочности сказываются колебания в качестве цемента и заполнителей, точность дозирования составляющих, тщательность приготовления бетонной смеси и другие факторы.

Для повышения однородности бетона необходимо применение цемента и заполнителей гарантированного качества, повышение уровня технологической дисциплины, автоматизация производства. Следовательно, для нормирования прочности необходимо использовать стандартную характеристику, которая гарантировала бы получение бетона заданной прочности с учетом возможных ее колебаний. Такой характеристикой является класс бетона.

Класс бетона – числовая характеристика какого-либо его свойства, принимаемая с гарантированной обеспеченностью 0,95. Это значит, что установленное классом свойство обеспечивается не менее чем в 95 случаях из 100 и лишь в 5 случаях можно ожидать его не выполненным.

Бетоны подразделяются на классы: В1; В1,5; В2; В2,5; В3,5; В5; В7,5; В10; В12,5; В15; В20; В25; В30; В40; В45; В50; В55; В60.

Тяжелые бетоны подразделяют на классы (марки) В7,5(100); В12,5(150); В15(200); В25(300); В30(400); В40(500); В45(600). Превышение класса (марки) бетона от заданной проектной прочности свыше 15% не допускается, так как это влечет перерасход цемента. При испытании образцов в виде кубов размером 150X150X150 мм применяют щебень наибольшей крупности зерен 40 мм.

При переходе от класса бетона (В) к средней прочности бетона, контролируемой на производстве для образцов с ребром 150 мм (при нормативном коэффициенте вариации 13,5%), можно применять формулу:  $R = V/0,778$ .

Для класса В10 средняя прочность бетона будет  $R = 12,9$  МПа, для класса В50  $R = 64,3$  МПа (таблица 4.2)

Деформационные свойства.

При твердении на воздухе происходит усадка бетона: бетон сжимается, и линейные размеры бетонных элементов сокращаются.

Усадка складывается из влажностной, карбонизационной и контракционной составляющих. Вследствие усадки бетона в бетонных конструкциях возникают усадочные напряжения, поэтому сооружения

большой протяженности разрезают усадочными швами во избежание трещин. При усадке бетона 0,3 мм/м в сооружении длиной 30 м общая усадка составляет около 10 мм. Массивный бетон высыхает снаружи, а внутри он еще долго остается влажным. Неравномерная усадка вызывает растягивающие напряжения в наружных слоях конструкции и появление внутренних трещин на контакте с заполнителем и в самом цементном камне.

Таблица 4.2 – Соотношение между классом и марками бетона по прочности

Класс бетона	Средняя прочность класса, кгс/см <sup>2</sup> (МПа)	Ближайшая марка бетона
B3,5	46 (4,6)	M50
B5	65 (6,5)	M75
B7,5	98 (9,8)	M100
B10	131 (13,1)	M150
B12,5	164 (16,4)	M150
B15	196 (19,6)	M200
B20	262 (26,2)	M250
B25	327 (32,7)	M350
B30	393 (39,3)	M400
B35	458 (45,8)	M450
B40	524 (52,4)	M550
B45	589 (58,9)	M600
B50	655 (65,5)	M600
B55	720 (72,0)	M700
B60	786 (78,6)	M800

Наибольшая усадка в бетоне происходит в начальный период твердения – за первые сутки она составляет до 60 – 70% от месячной усадки. Объясняется это тем, что в указанный период особенно интенсивно обезвоживается тесто вследствие испарения и поглощения влаги гидратирующимися зернами цемента. В результате обезвоживания частицы сближаются между собой, и цементный камень дает усадку. Усадка бетона протекает в течение длительного времени.

Длительное хранение бетона во влажных условиях замедляет усадку, однако влияние такого режима твердения на величину усадки невелико. При длительном твердении чистого цементного камня большое количество цемента гидратируется полностью, поэтому остается меньшее количество негидратированных зерен цемента, уменьшающих усадку: такое твердение приводит к увеличению усадки цементного камня. Цементный камень набирает прочность во времени, поэтому усадка, как правило, протекает без образования трещин. Если трещины все-таки образуются, например, вокруг частиц заполнителя, то величина общей усадки, замеренная на бетонных образцах, заметно снижается.

Усадка хорошо выдержанного бетона протекает быстрее и, следовательно, релаксация усадочных напряжений за счет ползучести

меньше. Кроме того, такой бетон обладает большой прочностью и меньшей ползучестью. Большая скорость усадки и меньшая ползучесть могут привести к образованию трещин, несмотря на более высокую прочность бетона при растяжении. Этим могут быть объяснены противоречивые результаты влияния длительности твердения на усадку бетона.

Для снижения усадочных напряжений и сохранения монолитности конструкций стремятся уменьшить усадку бетона. Наибольшую усадку имеет цементный камень. Введение заполнителя уменьшает количество вяжущего в единице объема материала, при этом образуется своеобразный каркас из зерен заполнителя, препятствующий усадке. Поэтому усадка цементного раствора и бетона меньше, чем цементного камня.

Бетон наружных частей гидротехнических сооружений, цементно-бетонных дорог периодически увлажняется и высыхает. Колебания влажности бетона вызывают попеременные деформации усадки и набухания, которые могут вызвать появление микротрещин и разрушение бетона.

Объемные изменения в бетоне в первый период твердения вызываются расширением от нагревания (иногда до 50°C внутри массивных конструкций) в результате экзотермических реакций гидратации цемента. Объемные изменения бетона могут вызвать значительные деформации конструкций и даже появление трещин. Для предотвращения их в массивных бетонных конструкциях устраивают специальные температурные швы. Чтобы уменьшить экзотермию бетона, применяют цементы с малым выделением тепла.

Бетон под нагрузкой ведет себя иначе, чем сталь и другие упругие материалы. Конгломератная структура бетона определяет его поведение при возрастающей нагрузке осевого сжатия. Область упругой работы бетона идет от начала нагружения до напряжения сжатия, при котором по границе сцепления цементного камня с заполнителем образуются микротрещины, при дальнейшем нагружении микротрещины образуются уже в цементном камне и возникают пластические неупругие деформации бетона.

Ползучесть – явление увеличения деформаций бетона во времени при действии постоянной статической нагрузки. Полная относительная деформация бетона при длительном действии нагрузки складывается из его начальной упругой и пластической деформации ползучести. Ползучесть проявляется при всех видах деформации. При растяжении бетона она в 1,5 раза выше, чем при сжатии.

Ползучесть бетона объясняют пластическими свойствами влажного цементного геля, а также возникновением и развитием микротрещин. Ползучесть зависит от вида цемента и заполнителей, состава бетона, его возраста, водоцементного отношения, влажности и условий твердения. Меньшая ползучесть бетонов на высокомарочных цементах и плотных заполнителях. Легкие бетоны на пористых заполнителях имеют большую ползучесть, чем тяжелые.

При небольших напряжениях и кратковременном нагружении для бетона характерна упругая деформация, подобная деформации пружины.

Модуль упругости бетона возрастает при увеличении прочности и зависит от пористости: увеличение пористости бетона сопровождается снижением модуля упругости. При одинаковой марке по прочности модуль упругости легкого бетона на пористом заполнителе меньше в 1,7 – 2,5 раза тяжелого. Еще ниже модуль упругости ячеистого бетона. Таким образом, упругими свойствами бетона можно управлять, регулируя его структуру. Модуль упругости бетона при сжатии и растяжении принимают равными между собой.

Ползучесть зависит от вида цемента и заполнителей, состава бетона, его возраста, условий твердения и влажности. Меньшая ползучесть наблюдается при применении высокомарочных цементов и плотного заполнителя – щебня из изверженных горных пород. Пористый заполнитель усиливает ползучесть, поэтому легкие бетоны имеют большую ползучесть по сравнению с тяжелыми.

Эксплуатационные свойства.

Отношение к действию высоких температур. Бетон – огнестойкий материал, выдерживающий высокие температуры во время пожара. Огнестойкость бетона позволяет применять его для устройства дымовых труб промышленных печей, их фундаментов.

Коррозия бетона.

Коррозия бетона на основе минеральных вяжущих, в первую очередь, начинается с разрушения матрицы – цементного камня, наиболее слабого, с точки зрения коррозии, компонента бетона (рисунок 4.8). Стойкость матрицы всегда ниже стойкости заполнителей.





Рисунок 4.8 – Коррозия цементного камня бетона

Первая причина недолговечности цементного камня – особенности его химического и фазового состава даже в условиях частичной или полной изоляции от окружающей среды.

Вторая причина – внешняя – физико-химические взаимодействия цементного камня с окружающей средой, в том числе коррозия цементного камня в воде и воздушной среде. Основные характеристики цементного камня, способствующие его активным взаимодействиям с окружающей средой – высокое значение рН твердеющей системы; значительная пористость, особенно капиллярная; высокая реакционная поверхность.

Различают три вида коррозии цементного камня бетона

Первый вид коррозии – выщелачивание. При фильтрации через толщу бетона воды и водных растворов, происходит растворение и вымывание компонентов цементного камня. Выщелачивание при действии пресных вод, главным образом, мягких, характеризующихся малой жесткостью, происходит из-за растворения гидроксида кальция. По мере снижения концентрации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  происходит разложение (гидролиз) других гидратов, устойчивых в растворах гидроксида кальция. Причем в первую очередь разлагаются высокоосновные гидросиликаты и гидроалюминаты кальция, затем их низкоосновные разновидности.

Коррозия выщелачивания приводит к нарушению химической целостности бетона. Особенно опасна фильтрация под напором при

фильтрации воды сквозь бетон, так как процесс растворения и вымывания компонентов бетона происходит более интенсивно.

Результат коррозии выщелачивания: нарушение химической целостности цементного камня и увеличение проницаемости поверхностных слоев бетона за счет образования полостей на месте растворенных компонентов материала.

Повышение стойкости бетона: понижают проницаемость бетона: ограничение содержания гидроксида кальция путем уменьшения алита в клинкере или введения активных минеральных добавок, химически связывающих гидроксид кальция; увеличение плотности структуры бетона известными способами

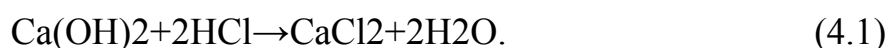
Второй вид коррозии обусловлен химическим взаимодействием веществ, содержащихся в растворе воды или в газообразной среде, с компонентами цементного камня. Химические взаимодействия – обменные реакции – между цементным камнем и раствором (обмен катионами). Образующиеся продукты реакции или легко растворимы и выносятся из структуры путем диффузии, фильтрационным потоком; или имеют вид аморфной массы, не обладающей вяжущими свойствами и не влияющей на разрушительный дальнейший процесс.

Второй вид коррозии происходит при воздействии на бетон растворов кислот и ряда солей.

Основные разновидности коррозии второго вида: общекислотная, углекислая, магниальная.

Общекислотная агрессия возникает обычно при действии на бетон речных вод, сильно загрязненных промышленными сточными водами. Скорость коррозии бетона зависит от кислотного аниона. Зачастую цементный камень подвергается воздействию соляной, серной, азотной, уксусной и молочной кислот. Кислые воды растворяют и разрыхляют, в первую очередь, поверхностные карбонизированные слои цементного бетона. Дальнейшая коррозия будет зависеть от ряда обстоятельств, которые должны рассматриваться в каждом отдельном случае применительно к виду той или иной кислоты и ее концентрации.

В первую очередь с агрессивным агентом взаимодействует гидроксид кальция. Например, при действии соляной кислоты образуются хорошо растворимый хлористый кальций:



Действие углекислоты зависит от среды, в которой присутствует  $\text{CO}_2$ .

Воздействие углекислоты, содержащейся в воздушной среде, заключается во взаимодействии  $\text{CO}_2$  с  $\text{Ca(OH)}_2$ , гидросиликатами и гидроалюминатами кальция с образованием малорастворимого  $\text{CaCO}_3$ . Частицы карбоната кальция создают собственную структуру, уплотняют поверхностные слои бетона, не ухудшая его свойства. Однако карбонизация гидроксида кальция уменьшает щелочность среды цементного камня с  $\text{pH} =$

12,5 до рН = 9. Это вызывает депассивацию и обуславливает коррозию стальной арматуры.

Углекислая коррозия развивается при действии на цементный камень водной среды, содержащей углекислый газ  $\text{CO}_2$ . При этом вначале идет реакция между  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  цементного камня и углекислотой с формированием малорастворимого  $\text{CaCO}_3$ . Дальнейшее воздействие  $\text{H}_2\text{CO}_3$  на цементный камень приводит к образованию растворимого гидрокарбоната.

Следовательно, агрессивность содержащейся в воде  $\text{CO}_2$  зависит от временной жесткости воды: чем больше жесткость, тем выше содержание равновесной и меньше агрессивной углекислоты. Количество агрессивной  $\text{CO}_2$  определяют опытным и расчетным путем. Скорость действия агрессивной  $\text{CO}_2$  растет пропорционально квадрату ее содержания.

Магнезиальная агрессия происходит при определенной концентрации катионов магния, причем степень их воздействия зависит от вида аниона. Чисто магнезиальная коррозия цементного камня наступает под действием растворимых солей магния, кроме  $\text{MgSO}_4$ . Вода, содержащая хлористый магний, взаимодействует, прежде всего, с гидроксидом кальция цементного камня:



Хлористый кальций легко растворяется в воде. Гидроксид магния мало растворим в воде, поэтому такая реакция идет до полного израсходования  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и перехода его в ту или иную растворимую соль, вымываемую из бетона. Гидроксид магния выпадает в рыхлый осадок белого цвета – бесвязную массу, не обладающую вяжущими свойствами. Под воздействием солей магния возможно разложение гидросиликатов и гидроалюминатов кальция. Это сопровождается разрушением бетона. Коррозия цемента под действием  $\text{MgCl}_2$  становится значительной, если концентрация соли в воде превышает 1,5 – 2 г/л. При содержании ионов магния менее 500 мг/л вода считается неагрессивной.

Результат коррозии второго вида: нарушение химической целостности цементного камня, ослабление структуры бетона вследствие изменения состава цементного камня; увеличение проницаемости поверхностных слоев бетона за счет образования полостей на месте растворенных компонентов материала.

Повышение стойкости бетона: увеличивают плотность бетона и снижают скорости обмена среды у поверхности конструкции. Требуемую долговечность бетона в условиях агрессивной среды достигают с помощью мероприятий:

- использование специального цемента, который обеспечивает сохранность бетона в агрессивной среде, если обычный цемент в плотном бетоне не гарантирует этого (вид цемента определяется составом агрессивной среды);
- формирование плотной структуры бетона;

– специальные меры по защите, если применение специального цемента и уплотнение структуры не обеспечивают долговечности бетона.

Третий вид коррозии объединяет процессы, при развитии которых в порах и капиллярах бетона накапливаются и кристаллизуются малорастворимые соли. Это вызывает значительные напряжения в стенках капилляров и пор, ограничивающих рост кристаллов, и вследствие этих напряжений – разрушение структуры. К этому виду коррозии относят процессы при действии сульфатов, связанные с накоплением и ростом кристаллов гидросульфоалюмината кальция, гипса и других соединений.

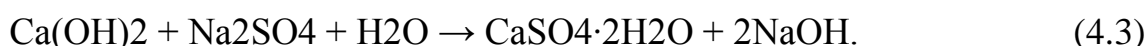
Отличие коррозии: в порах и капиллярах бетона образуются и кристаллизуются с большим увеличением объема новые соединения. Кристаллизация новообразований вызывает развитие высоких внутренних напряжений, растрескивание и разрушение бетона. Например, коррозия в сульфатных средах сопровождается разложением силикатов и алюминатов кальция и образованием гипса и гидросульфоалюминатов кальция.

К коррозии третьего вида относят также кристаллизацию в порах химических веществ при капиллярном всасывании растворов солей и испарении.

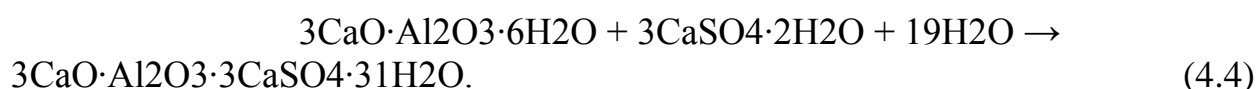
Разновидностями коррозии третьего вида (сульфатной коррозии) являются: гипсовая (с кристаллизацией гипса  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ); магниально-сульфатная (с кристаллизацией гипса  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и образованием  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ); сульфоалюминатная (с кристаллизацией этtringита  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ );

Сульфатная гипсовая агрессия происходит при действии вод, содержащих преимущественно сульфаты натрия.

Сульфат натрия взаимодействует с гидроксидом кальция цементного камня по схеме:

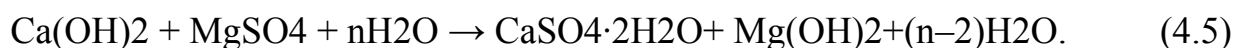


Образующийся сернокислый кальций повышает концентрацию в воде ионов  $\text{SO}^{2-}$  и  $\text{Ca}^{+2}$ , необходимую для взаимодействия с находящимся в твердой фазе трехкальциевым гидроалюминатом кальция и образования гидросульфоалюмината кальция (ГСАК) – этtringита :



В результате возникают большие внутренние напряжения, вызывающие образование трещин и разрушение цементного камня и бетона.

Магниально-сульфатная агрессия является наиболее сильной. При наличии гидроксида кальция в цементном камне происходит реакция:



В результате образуется гипс, и появляются аморфные рыхлые массы гидрооксида магния. Если вследствие этой реакции свободной извести  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  уже не будет в составе твердых фаз цементного камня, и величина рН заметно снизится, начнется гидролиз (точнее разрушение) гидроалюминатов и гидросиликатов кальция.

Результат коррозии третьего вида: растрескивание и последующее разрушение бетона за счет растущих кристаллов новообразований в цементном камне. Коррозия третьего вида наиболее разрушительна.

Основные мероприятия по предупреждению коррозии третьего вида:

- выбор цемента в зависимости от степени агрессивности среды;
- введение воздухововлекающих, пластифицирующих и повышающих растворимость  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{CaSO}_4$  добавок типа  $\text{CaCl}_2$ , СНВ, СДБ, кремнийорганических веществ;
- связывание  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  тонкодисперсными кремнеземистыми добавками;
- повышение плотности бетона различными способами, в том числе применением низких В/Ц и уплотняющих добавок.

Наибольшей стойкостью при коррозии третьего вида обладают бетоны на глиноземистом цементе.

Коррозия заполнителей бетона (щелочная коррозия).

В целом заполнители бетона – инертны, однако в составе заполнителей природного происхождения возможны компоненты, склонные к коррозии.

Причина коррозии заполнителя: взаимодействие соединений щелочных металлов (натрия и калия) с активными составляющими заполнителей:

- с кремнеземом заполнителя (аморфный кремнезем, некоторые разновидности микрокристаллического кварца);
- с карбонатами магния заполнителя (доломиты).

Заполнитель содержит аморфный кремнезем в виде опала, тридимита, кристобалита, халцедона, деформированного кварца. В результате взаимодействия образуется щелочекремнеземистый гель, который за счет адсорбции свободной воды набухает и вызывает расширение бетона. В бетоне возникают внутренние напряжения и, как результат, трещины или даже разрушения бетона. О протекании коррозии свидетельствуют трещины в бетоне, выделения влажного геля, который при высушивании образует белые высолы. Коррозия протекает очень медленно, разрушение наблюдается в поздние сроки.

В результате щелочной коррозии на поверхности контакта заполнителя с цементным камнем образуются гидратированные продукты, набухающие во влажных условиях, а в бетоне возникают растягивающие напряжения, вызывающие деформации, образование трещин, снижение прочности и разрушение бетона. В этих условиях на поверхности бетона образуется сетка трещин, затем происходит полная деструкция бетона. В отдельных случаях из пор бетона выдавливаются капли силикатного геля.

На поверхности некоторых железобетонных конструкций появляются своеобразные выколы в бетоне. Этот изъян сопровождается вздутием и

отрывом конусообразного куска бетона. В результате на поверхности остаются углубления типа кратеров. Образование подобных дефектов происходит в результате коррозии одного из компонентов заполнителя бетона, что сопровождается увеличением его объема и вызывает местные отрывы бетона с поверхности конструкций.

Вредные примеси, содержащиеся в заполнителях, могут вступать во взаимодействие с цементом, в результате чего в бетоне образуются соединения, снижающие его прочность или вызывающие коррозию.

К вредным примесям относят включения следующих пород и минералов:

- сульфаты – гипс, ангидрит;
- сульфиды – пирит, марказит, пирротин;
- аморфные разновидности кремнезема – халцедон, опал, кремнь, вулканические стекла;
- оксиды и гидроксиды железа – магнетит, гематит, гетит; слюды и гидрослюды – мусковит, биотит, вермикулит;
- галогенные соединения – хлориты, галит, сильвин;
- другие вещества – сера, графит, уголь, фосфорит.

Основные способы предупреждения щелочной коррозии:

- использование цементов с ограниченным содержанием растворимых щелочей (не более 0,6 %);
- введение в цемент активных минеральных добавок;
- замена реакционного заполнителя более устойчивым;
- использование бетонных смесей с низким водосодержанием;
- введение воздухововлекающих добавок или газообразующих веществ.

Морозостойкость бетона.

Морозостойкость бетона – способность бетона в насыщенном водой состоянии выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание

Снижение долговечности влажного бетона при его попеременном замораживании и оттаивании обусловлено в основном образованием льда в порах бетона. Поскольку объем, занимаемый льдом, на 9 % больше объема воды, стенки пор испытывают значительные растягивающие напряжения, постепенно расшатывающие бетон. С понижением температуры водонасыщенного затвердевшего бетона вода, проникая в поры цементного камня, замерзает аналогично замерзанию в капиллярах горных пород и вызывает расширение бетона.

Пористость и структура цементного камня – решающие критерии морозостойкости. Особенно важен характер распределения пор, заполненных водой. Вода замерзает в результате понижения температуры постепенно: начиная от самых больших капилляров и заканчивая самыми маленькими. Закрытые поры, не заполненные водой, не вызывают морозного разрушения.

Большие поры в бетоне, возникшие при недостаточном уплотнении, обычно заполнены воздухом и поэтому незначительно влияют на действие мороза.

Хотя поверхностное натяжение кристаллов льда в капиллярах создает в них давление, тем большее, чем меньше кристалл, замораживание начинается в больших порах и постепенно распространяется на поры малого размера.

Капиллярная вода превращается в лед при температуре приблизительно «–» 0,5 0С, поскольку в капиллярах находится раствор. Температура образования льда зависит от размера капилляров. При понижении температуры в зависимости от размеров капилляров образуется ледовая шуга, которая из больших по размеру капилляров вдавливаются в капилляры меньшего размера. Постепенно увеличивается объем, поскольку лед занимает объем на 1/11 (9 %) больше, чем вода. Возникающее кристаллизационное давление льда превышает 200 МПа. Лед образуется сначала на поверхности бетона, в зависимости от интенсивности охлаждения проникает к сердцевине бетона и вызывает увеличение объема.

Химически связанная вода никогда не превращается в лед.

Поры геля слишком малы для образования кристалликов льда при температуре выше « – » 730С, поэтому обычно лед в них не образуется. Гелевая вода превращается в лед только при очень низких температурах (полностью замерзает при « – » 730С). С понижением температуры вследствие разной энтропии воды геля и льда вода геля приобретает потенциальную энергию, позволяющую ей двигаться по капиллярам, содержащим лед. Диффузия воды геля приводит к росту кристаллов льда и к расширению цементного камня.

Различают два источника давления расширения.

Характер морозного разрушения бетона иллюстрирует рисунок 4.9.

Первый источник расширения: замерзание воды вызывает увеличение объема приблизительно на 9 % так, что избыток воды из пор удаляется. Скорость замораживания определяет скорость, с которой удаляется вода, вытесняемая фронтом льда. Величина гидравлического давления зависит от сопротивления фильтрации – от длины пути и проницаемости цементного камня между замерзшей порой и порой, в которую может переместиться избыток воды.

Второй источник расширения: возникает вследствие диффузии воды, приводящей к росту относительно небольшого количества кристаллов льда.



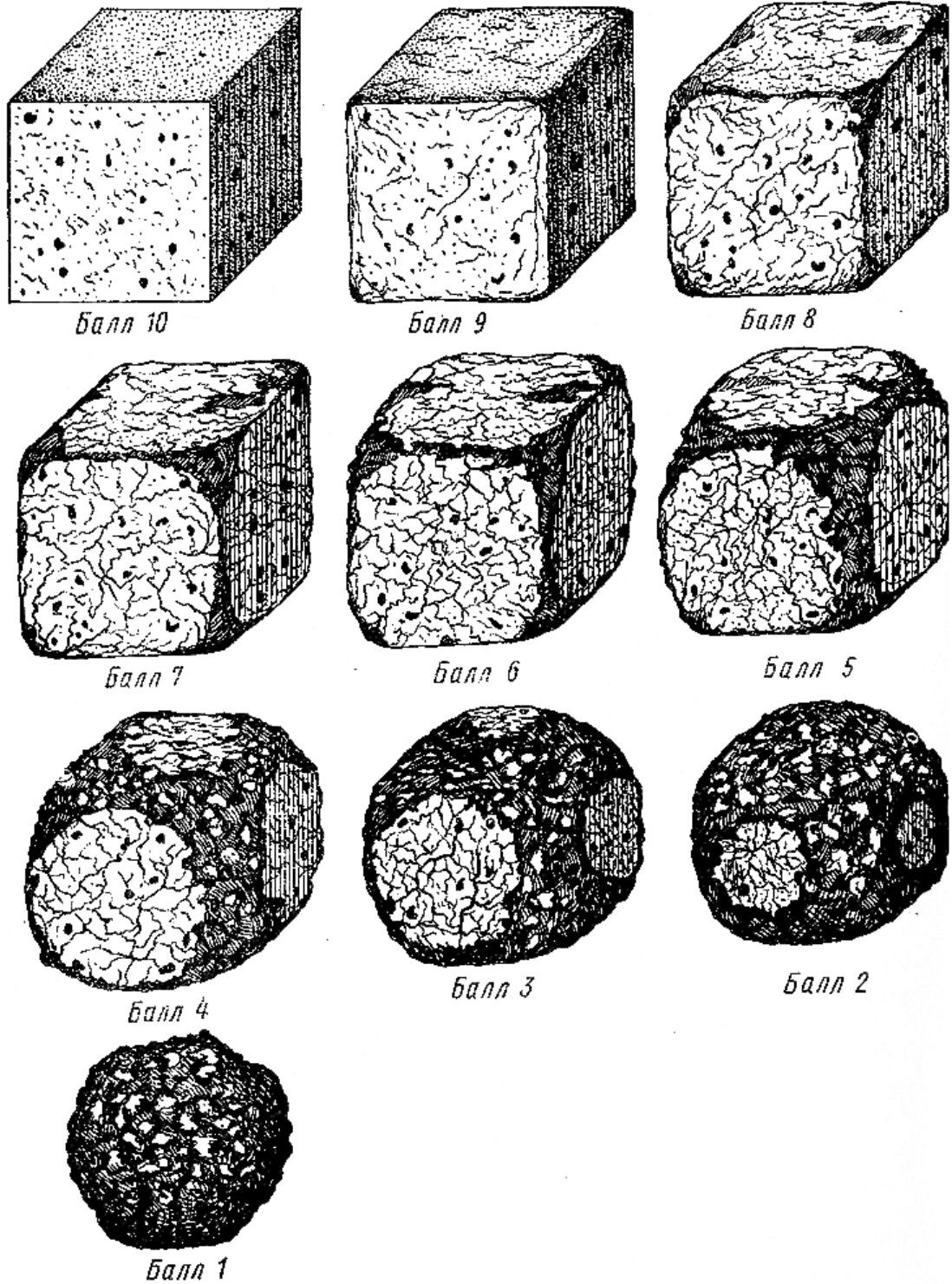


Рисунок 4.9 – Эволюция разрушения бетонных образцов

Циклическое замораживание на воздухе с оттаиванием в воде вызывает увеличение размера пор с переходом микрокапилляров в макрокапилляры. Первопричиной разрушения цементного камня при циклическом замораживании считают не льдообразование, а появление макрокапилляров в цементном камне, где начинает замерзать вода; это будет ускорять процесс разрушения.



Расширению препятствует твердый скелет бетона, в котором возникают весьма высокие напряжения. Повторяемость замерзания и оттаивания приводит к постепенному разупрочнению структуры бетона. Когда давление расширения в бетоне превышает предел его прочности при растяжении, происходит разрушение. Сначала разрушаются выступающие грани, затем поверхностные слои и постепенно разрушение охватывает весь объем бетона. Степень разрушения варьирует от шелушения поверхности до полного разрушения, так как линзы льда образуются, начиная с поверхности бетона, и распространяются вглубь. Некоторое влияние оказывают напряжения, вызываемые различием в коэффициентах температурного расширения составляющих бетона и температурно-влажностным градиентом.

Повреждения от действия воды и мороза – одно из наиболее распространенных проявлений недолговечности. В странах с суровым климатом наблюдаются значительные морозные разрушения бетона, если не приняты специальные меры при изготовлении изделий.

Морозостойкость бетона следует обеспечивать комплексом технологических мероприятий, а не назначением и подтверждением марок по морозостойкости.

Повышение морозостойкости бетона обеспечивают следующие основные технологические приемы:

- выбор качественных сырьевых материалов;
- строгое регламентирование процессов приготовления, укладки, уплотнения бетонной смеси, режима ТВО изделий;
- введение в бетонную комплекса химических добавок, регулирующих структуру бетона.

Рекомендации по выбору сырьевых материалов: алитовый низкоалюминатный бездобавочный портландцемент свежего тонкого помола (другие варианты допускаются при соответствующих условиях) – для обеспечения прочной кристаллической структуры цементного камня. Целесообразно ограничение щелочей (до 0,6 %) в цементах для морозостойких бетонов.

Морозостойкость заполнителя должна быть не ниже таковой бетона. Особые требования: чистота минерального состава, ограничение вредных примесей, оптимальный зерновой состав, близость значений модуля упругости для заполнителя и цементного камня.

Повышение морозостойкости возможно также путем применения бетонных смесей с водоцементным отношением, достаточно низким для получения мелкопористой структуры цементного камня и с малым количеством замерзающей воды. Обычно для получения морозостойкого бетона В/Ц должно быть менее 0,5. Важно обеспечить максимально возможную степень гидратации цемента до того, как бетон будет подвергнут замораживанию. Такой бетон имеет низкую проницаемость и не поглощает влаги в сырую погоду.

При проектировании составов тяжелого бетона на заданную марку по морозостойкости необходимо ограничивать в ту или иную сторону следующие характеристики: минимальный класс по прочности; максимальное водоцементное отношение; минимальный расход цемента; максимальный расход воды; минимальное воздухововлечение. Следует учитывать вид добавки и цемента.

Чтобы уменьшить опасность действия мороза, бетон должен быть тщательно уплотнен, поэтому недопустимо применение заполнителей и оборудования, которые обуславливают расслоение бетонной смеси и образование раковин. Применение очень крупных заполнителей или с большим содержанием лещадных зерен нежелательно, так как возможно образование скоплений воды под нижней поверхностью зерен крупного заполнителя.

Модифицирование бетона позволяет реализовать два различных способа повышения морозостойкости бетона:

- уплотнение структуры бетона, уменьшение объема макропор и их проницаемости для воды (снижение В/Ц; гидрофобизация стенок пор; кольматация пор пропиткой специальными составами);
- создание резервного объема воздушных пор в бетоне (специальные воздухововлекающие добавки, например, СНВ).

Воздухововлечение бетона – это искусственное образование закрытых воздушных пор в цементном камне. Закрытые, не заполненные водой поры служат как компенсационные пространства при увеличении объема льда на 9 % (при 0 0С) до 13 % (при «–»20 0С). Резервный объем воздушных пор не заполняется при обычном водонасыщении бетона, но доступен для проникновения воды под давлением, возникающем при ее замерзании.

#### **4.6 Виды современных бетонов**

Конец XX века ознаменован появлением модифицированных бетонов нового поколения, обладающих высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками и позволяющих возводить эстетичные и долговечные сооружения. Создано и освоено производство совершенно новых видов бетона. Сегодня в строительстве применяют около тысячи различных видов бетона, и процесс создания бетонов будущего интенсивно продолжается.

Создание эффективных бетонов открыло новую эру в строительстве. Уникальные свойства новых бетонов позволили реализовать грандиозные строительные проекты: тоннель под Ла-Маншем; небоскреб в Чикаго в 125 этажей и высотой 610 м; мост через пролив Акаси в Японии с центральным пролетом 1990 м. Мост через пролив Нордамберленд в Восточной Канаде длиной 12,9 км сооружен на опорах, которые на глубину более 35 м погружены в воду. При весьма суровых условиях эксплуатации (ежегодно бетон подвержен 100 циклам замораживания и оттаивания) конструкции этого моста рассчитаны на срок службы 100 лет. Выдающимся примером

реализации концепции высококачественных бетонов является построенная в 1995 году в Норвегии платформа для добычи нефти на месторождении Тролл в Северном море: полная высота 472 м (в 1,5 раза превышает высоту Эйфелевой башни), в том числе высота железобетонной части – 370 м. Платформа установлена на участке моря глубиной более 300 м и рассчитана на воздействие ураганного шторма с максимальной высотой волны 31,5 м. Расчетный срок эксплуатации – 70 лет.

Такие бетоны отличаются многокомпонентностью состава. Для получения бетонов используют комплексы химических добавок и наполнителей. Определенные требования предъявляются к вяжущим веществам и заполнителям. Например, разработаны современные эффективные вяжущие вещества, активные минеральные добавки и наполнители, армирующие волокна; успешно внедряются новейшие технологические приемы и методы получения строительных композитов.

Бетоны повышенной долговечности получают за счет управляемого структурообразования и активного воздействия на структурообразование на всех этапах технологии.

Значительным достижением и прогрессом в технологии бетона являются высококачественные высокотехнологичные бетоны (High Performance Concrete, НРС, термин принят в 1993 году рабочей группой) – многокомпонентные бетоны с высокими эксплуатационными свойствами и долговечностью. Бетоны НРС обладают высокой адсорбционной способностью и прочностью, низким коэффициентом диффузии и истираемостью, отличаются надежными защитными свойствами по отношению к стальной арматуре, химической стойкостью, бактерицидностью и стабильностью объема.

Основными критериями высококачественных бетонов считают:

- высокая прочность, включая повышенную раннюю прочность ( $R_1$  – не менее 25 – 30 МПа;  $R_{28}$  = 60 – 120 МПа и выше);
- высокая морозостойкость (F 400 и выше);
- низкая проницаемость по отношению к воде и химическим ионам (W 12 и выше);
- высокое сопротивление истираемости (не более 0,4 г/см<sup>2</sup>);
- низкое водопоглощение (не более 2,5 % по массе);
- низкая адсорбционная способность;
- низкий коэффициент диффузии;
- высокая химическая стойкость;
- высокий модуль упругости;
- бактерицидность и фунгицидность;
- регулируемые показатели деформативности, в том числе с компенсацией усадки в возрасте 14 – 28 сут естественного твердения.

Высококачественные бетоны – все виды бетонов различного функционального назначения, которые по показателям свойств соответствуют или превышают наиболее высокие качественные критерии, регламентируемые стандартами различных стран. В отличие от обычного

бетона марок М300 – М 600, высококачественный бетон обладает уникальными свойствами. Бетон может гармонично сочетаться с окружающей средой; иметь неограниченную сырьевую базу, низкую стоимость по сравнению с равнопрочной сталью, и несравненно высокую долговечность. При этом бетону свойственна высокая архитектурно-строительную выразительность; сравнительная простота и доступность технологии, возможность широкого использования местного сырья и утилизации техногенных отходов, малая энергоемкость и экологическая безопасность. Высококачественные бетоны станут основными суперконструкционными материалами в будущем.

Современные высококачественные бетоны – спектр композитов:

- высокопрочные и ультравысокопрочные бетоны;
- самоуплотняющиеся бетоны высококоррозионностойкие бетоны;
- реакционно-порошковые бетоны (Reaktionspulver beton – RPB или Reactive Powder Concrete – RPC).

Эти виды бетонов удовлетворяют высоким требованиям по прочности на сжатие и растяжение, трещиностойкости, ударной вязкости, износостойкости, коррозионной стойкости, морозостойкости.

Появление новых видов бетонов – следствие революционных достижений в области пластифицирования бетонных смесей; результат введения наиболее активных пуццолановых добавок – микрокремнезема, дегидратированных каолинов и высокодисперсных зол. Сочетание суперпластификаторов и, особенно, гиперпластификаторов на поликарбоксилатной и полигликолиевой основах позволяет получать сверхтекучие цементно-минеральные дисперсные системы и бетонные смеси. Благодаря этим достижениям количество компонентов в бетоне с химическими добавками достигло 6 – 8 наименований, а водоцементное отношение снизилось до 0,24 – 0,28 при сохранении подвижности с ОК= 4 – 10 см.

В настоящее время номенклатура тонкодисперсных наполнителей высоко-прочных бетонов значительно расширена. Предложено использовать измельченные отходы металлургической и энергетической промышленности, кварцевые пески, известняки и карбонаты, доломиты, имеющиеся практически во всех регионах страны. Доказано, что использование таких добавок особенно эффективно в комплексе с суперпластификаторами и армирующими элементами.

В последние годы при производстве высококачественных бетонов реализуется концепция использования реакционно-активных мономеральных и полиминеральных тонкодисперсных порошков на основе горных пород. Использование таких порошков ознаменовало появление нового класса бетонов, так называемых Reaktionspulverbeton. Такие бетоны многокомпонентные: количество ингредиентов достигает 7 – 9 наименований. Отсутствует крупный заполнитель, а мелкий заполнитель – это особо мелкие пески фракции не более 0,125 – 0,800 мм. Доля реакционно-активной каменной муки в таких бетонах составляет 40 – 50 % массы

цемента при содержании микрокремнезема до 15 – 22 %. Водоцементное отношение не превышает 0,09 – 0,12. Это тонкозернистые порошковые бетоны. Содержание воды в таких бетонах существенно снижается за счет высокого водоредуцирующего действия суперпластификатора в дисперсных системах. Водоредуцирующее действие в некоторых тонкодисперсных порошках может достигать значительных величин 1000 – 1500 %. Расход воды при одинаковой гравитационной текучести в дисперсных системах может быть снижен в 10 – 15 раз по сравнению с обычными суспензиями. Замещение части цемента, крупного и мелкого заполнителей тонкодисперсными микропорошками позволяет максимально реализовать разжижающее действие суперпластификаторов. С введением в такие бетоны стальных волокон в количестве 2,0 – 2,5 % объема прочность бетона при осевом растяжении может достигать 15 МПа, прочность на растяжение при изгибе – 50 МПа при прочности на сжатие 180 – 200 МПа.

DSP – композиты – уплотненные системы, содержащие гомогенно распределенные ультрамалые частицы. Материалы включают специально подготовленные цементы, микрокремнезем, особые заполнители, микроволокна. За счет специальных технологических приемов при В/Ц = 0,12 – 0,22 достигнута прочность 270 МПа при высокой стойкости к коррозионным воздействиям и истиранию. Известково-кварцевые материалы с прочностью на сжатие до 250 МПа получены путем формования под давлением 138 МПа перед автоклавированием. Аналогичная обработка цементного теста позволила снизить В/Ц до 0,06 и обеспечить прочность камня до 330 МПа в возрасте 28 сут нормального твердения. Использование алюминатных цементов и горячего прессования при давлении 345 МПа – повысили прочность до 650 МПа.

Мелкозернистость структуры бетона обладает рядом достоинств:

- возможность создания тонкодисперсной однородной высококачественной структуры без крупных включений крупных зерен иного строения;
- высокая тиксотропия и способность к трансформации бетонной смеси;
- высокая технологичность – возможность формирования конструкций и изделий методом литья, экструзии, прессования, штампования, набрызга;
- легкая транспортируемость;
- возможность широкого применения сухих смесей высокого качества;
- возможность получения материалов с различными комплексами свойств;
- возможность получения специальных видов бетона: фибробетона, армоцемента, декоративного, электропроводящего, гидроизоляционного и других;
- возможность новых архитектурно – конструктивных решений: изделия переменной плотности; тонкостенные и слоистые, гибридные конструкции;

– многофункциональность материала: возможность получения на определенной смеси из цемента и песка за счет варьирования соотношения, с помощью комплекса добавок и технологических приемов получить конструкционный теплоизоляционный, гидроизоляционный, декоративный бетоны;

– возможность широкого применения местных материалов и пониженная себестоимость по сравнению с классическим крупнозернистым бетоном.

Самоуплотняющийся бетон – компактная высокожидкая бетонная смесь. При формировании бетона использование вибрации минимально или исключено.

Самоуплотняющийся бетон – Self-Compacting Concrete (SCC) – способен уплотняться под действием собственной массы, полностью заполняя форму даже в густоармированных конструкциях. Изготовление самоуплотняющегося бетона наиболее полно отражает современные возможности технологии бетона.

Технология самоуплотняющегося бетона характеризуется повышением скорости бетонирования, снижением требований к перекачиванию и надежным заполнением всего объема. Технология обеспечивает максимальную однородность свойств бетона во всем объеме конструкции. Это объясняют исключением человеческого фактора, обуславливающего неравномерное уплотнение бетонных смесей при укладке. При изготовлении самоуплотняющегося бетона, кроме традиционных компонентов, используют мелкозернистые добавки, модификаторы вязкости и суперпластификаторы, позволяющие достичь долго-срочного сохранения текучести самоуплотняющейся массы.

Основной характеристикой SCC является диаметр расплыва при истечении из стандартного конуса Абрамса: более 60 см.

Обеспечить высокую подвижность бетонной смеси могут рационально подобранные эффективные супер- и гиперпластификаторы, наиболее оптимальными среди них являются поликарбоксилаты.

Высокая подвижность и стойкость к расслоению (высокая связность) таких смесей гарантируют однородность, минимальный объем пор и постоянство прочностных характеристик бетона, отличное качество поверхности и долговечность бетонных конструкций. Для минимизации пор гранулометрический состав заполнителя должен быть оптимизирован и В/Ц должно быть минимально. Для большинства бетонных смесей В/Ц составляет 0,3 – 0,4, что дает высокую раннюю прочность, ускоряет оборот опалубки и выпуск изделий.

Для достижения высоких эксплуатационных характеристик самоуплотняющихся бетонов предъявляют жесткие требования к материалам. Крупность мелкого заполнителя составляет не более 0,125 мм, причем 70 % из них размером 0,063 мм. Крупный заполнитель обязательно фракционируют по размерам 10–16 мм и 16–20 мм. Допускается применение неорганических материалов с высокой удельной поверхностью, которые

увеличивают водоудерживающую способность смеси (белая сажа, молотый асбест, бентониты). Например, 20 кг активного кремнезема заменяют 60 кг цемента и обеспечивают равнозначную прочность, в ранние сроки твердения прочность увеличивается.

Основные преимущества SCC:

- высокие реологические свойства бетонной смеси, которые сохраняются при динамическом воздействии длительное время, что позволяет транспортировать смесь на дальние расстояния;

- возможность укладки бетонной смеси в густоармированные конструкции, сложные по конфигурации, узкие, длинные опалубочные формы и труднодоступные места;

- отказ от вибрации при укладке (понижение уровня шума на строительной площадке, улучшение условий труда рабочих), сокращение времени при строительстве.

- высокая начальная прочность бетона;

- высокие физико-технические характеристики бетона, обеспечивающие его прочность и долговечность (B45 – B60, F400, W12 и более);

- высокое качество поверхностей бетонируемых конструкций.

Мелкозернистые добавки (известняковые порошки, молотый доменный шлак, зола-унос или кремнистые уносы) способствуют стойкости самоуплотняющейся бетонной смеси при перемешивании, снижают блокирование движения формовочной массы при протекании в плотно армированных конструкциях.

Количество добавки зависит от общего содержания мелкозернистых компонентов (цемента, песка с размером частиц размером менее 0,15 мм).

Содержание мелкозернистых добавок в 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси должно составлять 500 – 550 кг с учетом формы и максимальной крупности заполнителя.

Модификаторы вязкости повышают внутреннюю связность самоуплотняющегося бетона при течении и препятствуют сегрегации заполнителя – грубого каменного материала при высокой текучести бетонной смеси.

Выбор суперпластификатора определяется требованием очень высокого эффекта по снижению потребления воды и минимального изменения текучести самоуплотняющегося бетона во время транспортировки на строительный объект в течение 60 – 90 мин. Применяют суперпластификаторы на основе полимерных карбоксилатов (GLENIUM ACE 30). Концентрация добавок 1,0 – 1,6 %.

По причине экстремально высокого действия поликарбоксилата на водопотребность, которое является двукратным по сравнению с классическим, очень важно точное и чувствительное дозирование воды. Если передозирование воды в количестве 5 л/м<sup>3</sup> с обычным суперпластификатором не ведет к сепарации бетонных смесей, то для поликарбоксилата возникает состояние, когда бетонная смесь начинает

сепарироваться. По этой причине самоуплотняющиеся бетонные смеси должны готовиться только на бетонных заводах, где контролируют изменение влажности тонкой фракции заполнителя

Американскими учеными разработан бетон высокой растяжимости: – не разрушается даже после значительного изгиба (например, во время землетрясения), хотя и покрывается обширной сеткой мелких трещинок. Кроме того, бетон восстанавливает свою целостность после снятия нагрузки. Для этого нужен небольшой дождь, идущий несколько дней. Вода реагирует с соединениями в бетоне, а также с углекислым газом в атмосфере и формирует «шрамы» из карбоната кальция, которые скрепляют трещины. Причем после самовосстановления данный фрагмент бетона будет обладать практически такой же прочностью, как и до повреждения. Плита сохраняет целостность, хотя и покрывается трещинами. Обычный бетон при такой нагрузке просто разломался бы на куски. Возможность применения нового бетона: при прокладке дорог, строительстве мостов.

Основанием для получения и развития технологии высококачественных порошковых бетонов послужило создание композиционных вяжущих низкой водопотребности. Добавление в процессе помола ВНВ карбонатной или гранитовой муки, кварцевого песка существенно повышает водоредуцирующий эффект, а прочность бетона на таком вяжущем достигает 90 – 100 МПа.

MDF – цементы (цементы, свободные от макродефектов): при каландировании цементов в присутствии суперпластификаторов и гелеобразователей (например, поливинилацетата) при  $V/C = 0,10 - 0,18$  получены композиты чрезвычайно плотной микроструктуры без капиллярных пор. Прочность композитов: при изгибе 40 – 150 МПа, при сжатии 100 – 300 МПа. Аналогичные результаты получены на высокоглиноземистых цементах струйного помола, суперпластификатора и частично ацетилированного поливинилового спирта.

Перспективное совершенствование высокопрочных бетонов – доведение структуры до состояния, свободного от микродефектов (Micro – Defect – Free Concrete). Эффект теоретически предсказан в 1977 году. Структура таких бетонов формируется за счет низкого  $V/C$ , которое не превышает 0,15 – 0,20. Пористость бетона не более 4 – 6 %. Характер пористости меняется до тех пор, пока полностью не пройдет пуццоланическая реакция. Возможность достижения бетоном прочности при сжатии 1000 МПа. Хотя специалисты в области бетона считают более экономичными бетоны с максимальными размерами зерен заполнителей 0,5 – 16 мм и прочностью на сжатие 200 – 250 МПа, самыми прочными многокомпонентными бетонами должны стать порошковые.

Особо высокопрочные бетоны по зернистости заполнителей разделены на два вида: мелкозернистые с максимальной крупностью зерен каменного заполнителя 8 – 16 мм и тонкозернистые порошковые с максимальным размером зерен песка 0,5 мм. Оба вида включают высокодисперсную добавку микрокремнезема и суперпластификатора. В бетоны рекомендуют вводить



тонкомолотые горные породы – базальт, известняк, кварцевый песок. Для повышения прочности на растяжения, трещиностойкости, ударной прочности вводят фибры – стальные, стеклянные, полимерные волокна. Модифицирование бетона микрокремнеземом и дисперсной арматурой; замена крупного заполнителя на тонкодисперсный фракции не более 0,5 мм – основа для создания современных тонкозернистых порошковых бетонов нового поколения.

Высокие технические свойства порошковых бетонов обеспечены не только многокомпонентностью состава, а также высокими функциональными свойствами компонентов и новыми технологиями приготовления многокомпонентных бетонных смесей. Отдельные составляющие такого бетона определяются микроуровнем и наноуровнем (микрокремнезем, наносиликаты, наноуглероды). Такая плотная матрица позволяет усилить сцепление с дисперсной арматурой как укрупненного диаметра 0,5 – 2 мм, так и малого – 0,1 – 0,2 мм.

Другая причина возникновения дисперсноармированных порошковых бетонов – бетонные смеси обладают почти идеальной однородностью, что полностью исключает образование макродефектов и уменьшает количество микродефектов. Эволюция совершенствования структуры бетона с повышением прочности связана с уменьшением размеров крупного заполнителя с 20 – 40 мм до 3 – 10 мм. Последние 10 – 15 лет все высокопрочные и саморастекающиеся бетоны изготавливают из бетонных смесей с максимальной крупностью щебня, не превышающей 8 – 12 мм.

Третья причина появления порошковых бетонов – снижение внутреннего трения при течении дисперсных суспензий по сравнению с крупнозернистыми массами. Высокая текучесть позволяет изготавливать ажурные конструкции, тонкостенные скорлупы, оболочки, купола и другие филигранные конструкции.

Следующая мотивация появления порошковых дисперсноармированных бетонов – непропорционально высокое повышение прочности при сжатии по сравнению с прочностью при изгибе и осевом растяжении. Это позволило осуществлять строительство ажурных безопорных мостов.

За счет использования высокопрочного бетона появляется возможность значительной экономии всех сухих компонентов бетона при уменьшении сечения, особенно для центрально и внецентренно сжатых элементов.

Пятая причина – возможность существенного повышения трещиностойкости дисперсноармированных порошковых бетонов. В обычных бетонах трещиностойкость повышается только за счет наполнения зернистым мелким и кусковым крупным заполнителями. В порошковых бетонах, не имеющих в структуре такого малодеформируемого остова, уменьшение деформаций может быть достигнуто введением дисперсной арматуры. В результате повышения трещиностойкости бетона и высокой прочности на растяжение полезным, оказалось, осуществлять комбинированное армирование несущих конструкций сочетанием

преднапряженной стержневой или прядевой арматуры с дисперсной арматурой или тканевым каркасом. Веским основанием для перехода от щебеночных, мелкозернистых и песчаных литых бетонов к порошковым бетонам послужило прогрессирующее развитие ткацкой промышленности в развитых странах (США, Канада, Франция, Германия), способной выпускать объемные мелкосеточные каркасы из полипропиленовых, полиамидных, полиакрилатных и целлюлозных волокон.

Введение фибры повышает прочность при сжатии на 25 – 30 %, при этом прочность на растяжение при изгибе увеличивается в 1,6 – 1,8 раза и составляет 16 – 18 МПа. При увеличении степени армирования до 2 – 3 % прочность на растяжение при изгибе может возрастать в 2,5 – 3 раза. Поэтому предел прочности при сжатии реакционно-порошкового фибробетона в возрасте 28 сут достиг 129 – 130 МПа. Разрушение неармированных порошковых бетонов носит хрупкий «взрывной» характер с появлением большего количества осколков. Дисперсноармированный бетон имеет пластический характер разрушения вплоть до нагрузки 0,95 RPAЗР с сохранением целостности бетонных образцов. Фибробетон выгодно отличается от традиционного бетона, имея в несколько раз более высокие показатели прочности на растяжение и срез, ударную и усталостную прочность, трещиностойкость и вязкость разрушения, морозостойкость, водонепроницаемость, сопротивление кавитации, жаропрочность и жаростойкость. По показателю работы разрушения фибробетон в 15 – 20 раз превосходит обычный бетон. Это обеспечивает высокую технико-экономическую эффективность фибробетона в строительных конструкциях.

Самовосстанавливающийся бетон – получают на основе нового цемента, который самостоятельно восстанавливает себя, используя определенный тип живых бактерий и лактат кальция. Бактерия, содержащаяся в цементе, поглощает лактат кальция и образует карбонат кальция, который заполняет трещины и практически до изначального состояния восстанавливает целостность бетона. Этот концепт «живого бетона» может сэкономить время и материалы для ремонта, так как все необходимые материалы будут заложены в бетон изначально.

#### **4.7 Контрольные вопросы**

1. Бетон: понятие, назначение, классификация, преимущества.
2. Материалы для получения бетона: перечень, назначение.
3. Бетонная смесь: понятие, свойства, классификация.
4. Факторы влияния на удобоукладываемость бетонных смесей.
5. Структура бетона: виды, влияние на свойства.
6. Марки и классы бетона по прочности. Факторы влияния на прочность.
7. Усадка бетона: понятие, причины, последствия.
8. Коррозия бетона: виды, причины, способы предотвращения.
9. Морозостойкость бетона: понятие, факторы влияния.
10. Основные виды и возможностей современных бетонов.

## РАЗДЕЛ 5. СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАСТВОРЫ

### 5.1 Общие сведения

*Строительный раствор* – это искусственный каменный материал, полученный в результате затвердевания растворной смеси, состоящей из вяжущего вещества, воды, мелкого заполнителя и добавок, улучшающих свойства смеси и растворов. Крупный заполнитель отсутствует, так как раствор применяют в виде тонких слоев.

Для изготовления строительных растворов чаще используют неорганические вяжущие вещества (цементы, воздушную известь и строительный гипс).

Строительные растворы разделяются в зависимости от вида вяжущего вещества, величины плотности и назначения.

По *виду вяжущего вещества* различают растворы цементные, известковые, гипсовые и смешанные (цементно-известковые, цементно-глиняные, известково-гипсовые и др.).

По *плотности* различают: тяжелые растворы плотностью более  $1500 \text{ кг/м}^3$ , изготавливаемые обычно на кварцевом песке; легкие – плотностью менее  $1500 \text{ кг/м}^3$ , изготавливаемые на пористом мелком заполнителе и с породообразующими добавками.

По назначению различают строительные растворы: кладочные – для каменной кладки стен, фундаментов, столбов и др.; штукатурные – для оштукатуривания внутренних стен, потолков, фасадов зданий; монтажные – для заполнения швов между крупными элементами (панелями, блоками и т.п.) при монтаже зданий и сооружений из готовых сборных конструкций и деталей; специальные растворы (декоративные, гидроизоляционные, тампонажные и др.).

### 5.2 Материалы для изготовления растворных смесей

*Вяжущие вещества.* Применяют портландцемент и шлакопортландцемент, принимают марку цемента в 3-4 раза выше марки раствора. Воздушную известь в виде известкового теста вводят в смеситель при изготовлении растворной смеси; реже используют молотую негашеную известь. Строительный гипс входит в состав гипсовых и известково-гипсовых растворов.

*Пески* применяют природные — кварцевые, полевошпатовые, а также искусственные — дробленые из плотных горных пород и пористых пород; из искусственных материалов (пемзовые, керамзитовые, перлитовые и т. п.). Пористые пески служат для приготовления легких растворов. Если песок содержит крупные включения (комья глины и др.), его просеивают. Для кирпичной кладки применяют растворы на песках с зернами не более 2 мм, для растворов марки М100 и выше пески должны удовлетворять тем же требованиям в отношении содержания вредных примесей, что и пески для

изготовления бетона. Для растворов марки М50 и ниже допускается по соглашению сторон содержание пылевидных частиц до 20% по массе.

*Пластифицирующие добавки.* Чаще всего растворные смеси укладывают тонким слоем на пористое основание, способное отсасывать воду (кирпич, бетоны легкие, ячеистые и т. п.). Чтобы сохранить удобоукладываемость растворных смесей при укладке на пористое основание, в них вводят неорганические и органические пластифицирующие добавки, повышающие способность растворной смеси удерживать воду.

*Неорганические дисперсные добавки* состоят из мелких частиц, хорошо удерживающих воду (известь, глина, зола ТЭС, диатомит, молотый доменный шлак и т. п.). Глина, используемая в качестве пластифицирующей добавки, не должна содержать органических примесей и легкорастворимых солей, вызывающих появление “выцветов” на фасадах зданий. Глину вводят в растворную смесь в виде жидкого теста.

*Органические поверхностно-активные пластифицирующие и воздухововлекающие добавки:* омыленный древесный пек, канифольное мыло, мылонафт, ЛСТ и другие вводят в количестве 0,1-0,3% от массы вяжущего. Они не только улучшают удобоукладываемость растворных смесей, но также повышают морозостойкость, снижают водопоглощение и усадку раствора.

В растворы, применяемые для зимней кладки и штукатурки, добавляют ускорители твердения, понижающие температуру замерзания растворной смеси: хлористый кальций, поташ, хлористый натрий, хлорную известь и др.

### 5.3 Свойства строительных растворов

*Удобоукладываемость* – это свойство растворной смеси легко укладываться плотным и тонким слоем на пористое основание и не расслаиваться при хранении, перевозке и перекачивании растворонасосами. Она зависит от подвижности и способности смеси.

*Подвижность* смесей характеризуется глубиной погружения металлического конуса (массой 300 г) стандартного прибора (рисунок 5.1). Подвижность назначают в зависимости от вида и отсасывающей способности основания. Для кирпичной кладки подвижность раствора составляет 9 – 13 см, для заполнения швов между панелями и другими сборными элементами – 4 – 6 см, а для вибрирования бутовой кладки – 1 – 3 см.

*Водоудерживающая способность* – это свойство растворной смеси сохранять воду при укладке на пористое основание, что необходимо для сохранения подвижности смеси, предотвращения расслоения и хорошего сцепления раствора с пористым основанием. Водоудерживающую способность увеличивают путем введения в растворную смесь неорганических дисперсных (*состоящих из мелких частиц*) добавок и органических пластификаторов. Смесь с этими добавками отдает воду пористому основанию постепенно, при этом он становится плотнее, хорошо сцепляется с кирпичом, отчего кладка становится прочнее.

Удобоукладываемую растворную смесь получают, если правильно назначен зерновой состав ее твердых составляющих, определяемой соотношением песка, вяжущего и дисперсной добавки. Тесто вяжущего заполняет пустоты между зернами песка и равномерно покрывает песчинки тонким слоем, уменьшая внутреннее трение. С удобоукладываемой растворной смесью удобно работать, в результате повышается производительность труда. От удобоукладываемости растворной смеси зависит качество каменной кладки. Правильно подобранная растворная смесь заполняет неровности, трещины, углубления в кирпиче или камне, поэтому получается большая площадь контакта между раствором кирпичом (камнем), в результате прочность и монолитность кладки возрастает. Увеличивается долговечность стен.



Рисунок 5.1 – Стандартный конус

Основным свойством строительных растворов являются: прочность (марка) к заданному сроку твердения, сцепление с основанием, морозостойкость и деформативные характеристики: усадка в процессе твердения, влияющая на трещиностойкости, модуль упругости, коэффициент Пуассона.

*Прочность* при сжатии определяют испытанием образцов-кубиков с длиной ребра 7,07 см в возрасте, установленном в стандарте или технический условиях на данный вид раствора. Изготовление образцов из растворной

смеси подвижностью менее 5 см производят в обычных формах с поддоном, а из смеси с подвижностью 5 см и более – в формах без поддона, установленных на основании-кирпиче (покрытой смоченной водой газетной бумагой).

Прочность цементного раствора при отсутствии отсоса воды определяется теми же факторами, что и прочность бетона; зависимость прочности раствора при сжатии  $R_{28}$  от активности цемента  $R_{ц}$  и цементно-водного отношения определяется формулой:

$$R = 0,4R_{ц}(Ц / В - 0,3) \quad (5.1)$$

Прочность раствора, уложенного на пористое основание (кирпич), удобно выразить в зависимости от расхода вяжущего вещества, а не от Ц/В, поскольку после отсоса воды основанием в растворе остается примерно одинаковое количество воды:

$$R_{28} = kR_{ц}(Ц - 0,05) + 4 \quad (5.2)$$

Приведенная формула применима для цементно-известковых растворов: Ц – расхода цемента, т/м<sup>3</sup> песка; коэффициент k зависит от количества песка: для крупного песка – 2,2, песка средней крупности – 1,8, мелкого песка – 1,4.

Прочность смешанных растворов зависит от количества введенной в раствор извести или глины. Оптимальная добавка известкового или глинистого теста, позволяющие получить удобоукладываемые растворные смеси и плотные растворы, соответствует максимуму на кривых прочности, приведенных на рисунке 6.2 для растворных смесей разного состава – от «жирных» состава 1:3 до «тощих» состава 1:2:9; состав указан в объемных частях цемент: тесто (известковое, глиняное): песок.

На основании Закономерностей, управляющих прочностью растворов, составлены таблицы рекомендованных составов разных марок, которыми широко пользуются на практике.

Строительные растворы по прочности в 28-суточном возрасте при сжатии делят на марки: 4, 10 25, 50, 75, 100, 150, 200. Растворы марок 4 и 10 изготавливают на воздушной и гидравлической смеси и др.

Понижение температуры замедляет рост прочности растворов.

Следовательно при низких положительных температурах прочность раствора в возрасте 28 сут составляет 55 – 72 % от марки.

Поэтому в зимнее время широко применяют растворы с химическими добавками (поташа, нитрата натрия) понижающим температуру замерзания раствора и ускоряющими набор его прочности. Зимой марку раствора для каменной кладки (без тепляков) и монтажа крупнопанельных стен обычно повышают на одну ступень против марки при летних работах (например, 75 вместо 50).

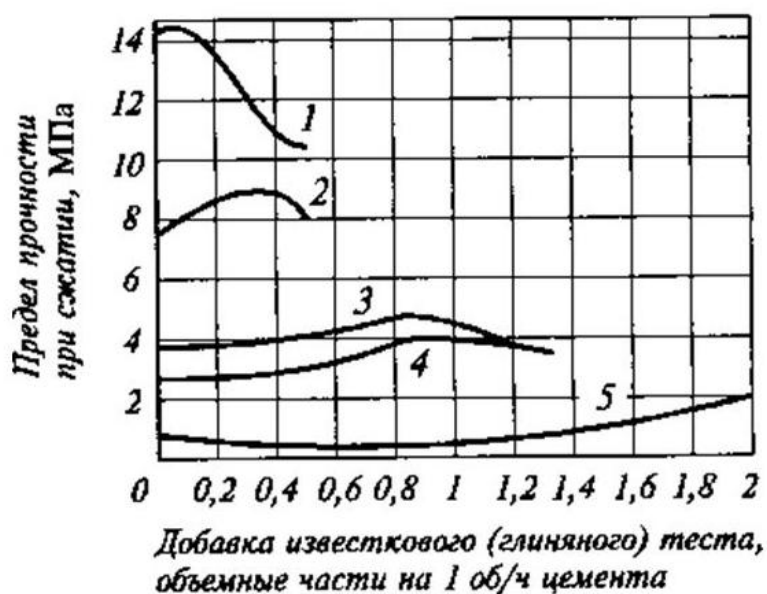


Рисунок 5.2 – Общий характер влияния дисперсных добавок (известки, глины) на прочность растворов состава (цемент: песок по объему): 1 – 1:3; 2 – 1:4; 3 – 1:5; 4 – 1:6; 5 – 1:9

*Морозостойкость* раствора характеризуется числом циклов попеременного замораживания и оттаивания, которое выдерживают насыщения водой стандартные образцы-кубики размером 7,07x7,07x7,07 см (допускается снижение прочности образцов не более 25% и потеря массы не свыше 5%).

Строительные растворы для каменной кладки наружных стен и наружной штукатурки имеют марки по морозостойкости: F10, F15, F25, F35, F50, причем марка повышается для влажных условий эксплуатации. В таких условиях растворы удовлетворяют и более высоким требованиям по морозостойкости: F 100, F 150, F 200, F 300. Морозостойкость растворов зависит от вида вяжущего вещества, водоцементного отношения, введенных добавок и условий твердения.

#### 5.4 Виды строительных растворов

Для каменной кладки наружных стен зданий применяют главным образом цементные и смешанные растворы (цементно-известковые и цементно-глиняные) марок 10, 25, 50 в зависимости от влажностных условий и требуемой долговечности здания. В кладке перемычек, простенков, карнизов, столбов марка может быть повышена до 100.

Виброкирпичные панели изготовляют с применением растворов марки 75, 100, 150, приготовленных на портландцементе и шлакопортландцементе.

*Монтажные растворы* для заполнения горизонтальных швов при монтаже стен из легкого бетона должны иметь марку не ниже 50, а для панелей из тяжелого бетона – не ниже 100.

Минимальные расходы цемента для растворов различного назначения 75-125 кг/м<sup>3</sup> песка принимают для подземной кладки зданий в зависимости от относительной влажности воздуха в помещениях, а для кладки фундаментов – в соответствии с влажностью грунтов.

Для кладки во влажных грунта и ниже уровня грунтовых вод применяют растворы на портландцементе с активными минеральными добавками или на шлакопортландцементе (с минимальным расходом цемента 125 кг/м<sup>3</sup>).

*Штукатурные растворы.* Для наружных каменных и бетонных стен зданий применяют цементно-известковые растворы, а для оштукатуривания деревянных поверхностей в районах с сухим климатом используются известково-гипсовые растворы. Внутреннюю штукатурку стен и покрытий здания при относительной влажности воздуха помещений до 60% выполняют из известковых, гипсовых, известково-гипсовых и цементно-известковых растворов.

Подвижность штукатурных растворов и предельная крупность применяемого песка для каждого слоя штукатурки различны. Подвижность раствора для подготовительного слоя при нанесении и механизированным способом составляет 6-10 см, а при ручном труде – 8-12 см. Наибольшая крупность песка при этом должна быть не более 1,2 мм для увеличения подвижности штукатурных растворов вводят гидрофобно-пластифицирующие добавки.

Фирма «Кнауф» (Германия) выпускает для отечественного рынка гипсовые штукатурные смеси «Гольдбанд» - для бетонных и кирпичных поверхностей и «Ротбанд» - для оштукатуривания потолков и стен из любых материалов. Эти смеси отличаются комплексом высоких технологических и эксплуатационных свойств.

*Декоративные растворы* предназначены для отделочных слоев стеновых панелей и блоков, наружной и внутренней отделки зданий. Эти растворы изготовляют на белом, цветном и обычном портландцементе; для цветных штукатурок внутри зданий применяют также строительный гипс и известь. Заполнителем служит чистый кварцевый песок либо дробленые пески из белого известняка, мрамора и т.п. Для лицевого отделочного слоя панелей наружных стен (из легкого бетона) применяют раствор марки 50, для отделки ж/б конструкций – 150 с морозостойкостью не ниже 35.

*Гидроизоляционные растворы* для гидроизоляционных слоев и штукатурок обычно изготовляют состава 1:2,5 или 1:3,5 (цемент : песок по массе)/цементы, сульфатостойкий портландцемент.

*Инъекционные цементные растворы* применяют для заполнения каналов в предварительно напряженных конструкциях и уплотнения бетона. Марка раствора должны быть не ниже 300, поэтому используют портландцемент марки 400-500.

*Рентгенозащитный раствор* готовят на баритовом песке (BaSO<sub>4</sub>) предельной крупностью 1,25 мм, применяя портландцемент, или



шлакопортландцемент. В него вводят добавки, содержащие легкие элементы: литий, бор и др.

## 5.5 Сухие смеси

Строительные сухие смеси – это композиции заводского изготовления на основе минеральных вяжущих веществ, включающие заполнители и добавки. В отдельных случаях в качестве вяжущего могут быть использованы водорастворимые или водоземмульгируемые полимеры. На место производства строительных работ сухие смеси доставляются в расфасованном виде, причем для их использования по назначению достаточно только добавить необходимое количество воды.

Сухие смеси по сравнению с товарными и бетонными смесями имеют ряд преимуществ: сокращение количества технологических операций для перевода сухих смесей в рабочее состояние; повышение качества строительных работ благодаря заводскому приготовлению смесей; сокращение транспортных расходов на 15%; сокращение отходов растворов на 5-7% в результате порционного приготовления; повышение производительности труда на 20-25% вследствие повышения пластичности растворов.

В настоящее время сухие смеси являются одним из направлений технического прогресса в строительстве, их применяют в качестве кладочных, монтажных и штукатурных растворов, шпатлевок, плиточных клеев, составов для наливных полов, ремонтных составов.

*Материалы применяемые для сухих смесей.* В качестве вяжущего используют порошкообразные минеральные вяжущие: портландцемент, строительный гипс, воздушную известь. В отдельных случаях применяют в качестве связующего порошкообразные полимеры, которые растворяются в воде, либо образуют эмульсии (эфир целлюлозы, поливинилацетат, акрилаты).

В качестве заполнителя широко применяется песок для строительных работ с модулем упругости 1-2, причем небольшая крупность зерен не должна превышать 1,25 мм. Для легких растворов применяют пористые вспученные пески (перлитовые, вермикулитовые, керамзитовые). Для шпатлевок применяют известковую муку и порошкообразный мел.

Большую роль в приготовлении сухих смесей играют добавки. Поскольку растворные смеси, приготавливаемые из сухих смесей, укладываются, как правило, на пористые основания тонким слоем, то для обеспечения пластичности и водоудерживающей способности применяются неорганические и органические пластифицирующие добавки: глина, воздушная известь, зола ТЭС, суперпластификатор С-3.

Для повышения адгезии (сцеплении поверхностей разнородных тел), трещиностойкости и непроницаемости в состав сухих смесей вводят полимерные добавки, которые, как указывалось выше, должны находиться в

порошкообразном состоянии, быть водорастворимыми либо образовывать эмульсии с водой.

Для производства работ при отрицательных температурах в состав сухих смесей вводят противоморозные добавки: поташ, нитрит нитрата натрия, формиат кальция. При этом особые требования предъявляются к гигроскопичности добавок (*способность поглощать влагу из окружающей среды*).

Вода для затворения сухих смесей не должна содержать вредных примесей.

Показатели качества сухих смесей должны соответствовать области применения смеси. Если сухая смесь используется в качестве кладочного раствора, то у нее должен быть следующий комплекс показателей качества: пластичность, водоудерживающая способность, предел прочности при сжатии, морозостойкость.

В зависимости от назначения растворных смесей изготовление их осуществляется в заводских условиях с использованием комплекса оборудования, которыми оснащены бетонорастворные узлы. Технология производства сухих смесей складывается из следующих технологических операций: поступаемый с карьера песок или гравийно-песчанная смесь подвергается тепловой обработке в сушильных агрегатах, где их влажность доводят до 0,5%, затем производят рассев на ситах до нужных фракций. Просеянный песок после дозирования направляет в смеситель принудительного действия. Просеянный песок после дозирования направляется в смеситель принудительного действия. В этот же смеситель загружают другие компоненты в необходимом количестве. Отдозированные материалы перемешивают до получения однородной массы. Полученную смесь затаривают в емкости, необходимые для реализации и подают на склад готовой продукции. Если затаривание не предусмотрено, то смесь сразу поступает в бункер склада готовой продукции. Такая технологическая схема получения сухих смесей осуществляется при применении песков мелкой и очень мелкой фракции. Смеси хранят в сухом месте, а модифицированные полимеры при температуре не выше 40° С.

### 5.5.1 Сухие строительные смеси КНАУФ на гипсовой основе



#### **КНАУФ-Ротбанд**

КНАУФ-Ротбанд – Штукатурка гипсовая универсальная

*Область применения:* КНАУФ-Ротбанд – универсальная сухая штукатурная смесь на основе гипсового вяжущего с добавками, обеспечивающими повышенную адгезию. Предназначена для высококачественного штукатуривания вручную потолков и стен обычным твердым основанием

(бетон, кирпич, цементная штукатурка), а также поверхностей из пенополистирола, ЦСП, внутри помещений с нормальной влажностью, а также в кухнях и ваннах. Особенно рекомендуется для гладких бетонных потолочных и стеновых поверхностей. Обеспечивает прочное сцепление с основанием и не трескается. Лёгкая и экономичная, расход в 2,5 раза меньше цементно-песчаных штукатурок. Регулирует влажностный режим в помещении - “дышит”, создавая благоприятный уровень комфортности.

*Технические характеристики:*

- Толщина штукатурного слоя минимальная: 5 мм; максимальная: 50 мм
- Размер зерна: до 1,2 мм
- Выход раствора из 100 кг смеси: ~120 л
- Расход сухой смеси при слое 10 мм: ~ 8,5 кг/м<sup>2</sup>
- Высыхание слоя 15–20 мм при температуре 20°С и влажности воздуха 60%: ~ 7 суток
- Прочность при сжатии: > 2,5 МПа, при изгибе: > 1,0 МПа.



### **КНАУФ-Гольдбанд**

*Область применения:* КНАУФ Гольдбанд сухая штукатурная смесь на основе гипсового вяжущего с полимерными добавками. Предназначена для высококачественного оштукатуривания вручную стен (кирпичная кладка, цементная штукатурка, плотный и пористый бетон), а также поверхностей из пенополистирола и ЦСП внутри помещений с нормальной влажностью, включая стены и ванные комнаты.

*Технические характеристики:*

- Толщина штукатурного слоя минимальная: 8 мм; максимальная: 50 мм
- Размер зерна: до 1,2 мм
- Выход раствора из 100 кг смеси: 115–120 л
- Расход сухой смеси при слое 10 мм: ~ 8,5 кг/м<sup>2</sup>
- Высыхание слоя 15 – 20 мм при температуре 20°С и влажности воздуха 60%: ~ 7 суток
- Прочность при сжатии: > 2,5 МПа, при изгибе: > 1,0 МПа.



### **КНАУФ-МП 75**

Штукатурка гипсовая машинного нанесения. Расход: на 1 кв. метр при толщине 10 мм без учета потерь – 10 кг.  
*Область применения:* КНАУФ-МП 75 – сухая смесь на основе гипсового вяжущего с полимерными добавками.

Предназначена для высококачественного оштукатуривания стен и потолков внутри помещений машинным способом, например, с помощью штукатурных машин PFT G4, PFT G5, что обеспечивает значительное превосходство в производительности по сравнению с ручным способом при больших объемах работ. Наносится на все обычные твердые основания (кирпичная кладка, цементная штукатурка, бетон и т.п.).

*Технические характеристики:*

- Толщина штукатурного слоя минимальная: 8 мм; максимальная: 50 мм
- Насыпной вес: 850 кг/м<sup>3</sup>
- Зернистость: до 1,2 мм
- Выход раствора из 100 кг смеси: 100 л
- Расход сухой смеси при слое 10 мм: ~ 10 кг/м<sup>2</sup>
- Высыхание слоя 15 – 20 мм при температуре 20°C и влажности воздуха 60%: ~ 7 суток
- Прочность при сжатии: > 2,5 МПа; при изгибе: > 1,0 МПа.



### **КНАУФ-Перлфикс**

Клей гипсовый монтажный. Расход материала на 1 кв.метр ГКЛ без учета потерь - 5 кг.

*Область применения:* КНАУФ-Перлфикс – сухая монтажная смесь на основе гипсового вяжущего со специальными добавками. Предназначена для приклеивания КНАУФ-листов (ГКЛ), изоляционных материалов пенополистирольных и минераловатных плит) на кирпичные, бетонные, оштукатуренные, поробетонные основания стен с неровной поверхностью. Применяется только внутри помещений.



### **КНАУФ-Фуген**

Шпаклевка гипсовая универсальная

*Область применения:* КНАУФ-Фуген – сухая шпаклевочная смесь для внутреннего применения на основе гипсового вяжущего с полимерными добавками. Предназначена для:

- заделки стыков КНАУФ-листов (ГКЛ) с любыми кромками с использованием бумажной армирующей ленты;
- приклеивания к ровной поверхности КНАУФ-листов;
- заделки головок шурупов на поверхности КНАУФ-листов;

- сплошного тонкослойного шпаклевания плоских бетонных и оштукатуренных поверхностей;
- заполнения стыков сборных бетонных элементов;
- заделки возможных повреждений КНАУФ-листов;
- склеивания и шпаклевания гипсовых элементов.

*Технические характеристики:*

- Толщина слоя шпаклевки: до 5 мм
- Размер фракции: не более 0,15 мм
- Выход раствора на 1 кг смеси: 1,3 л
- Прочность при сжатии: 5,2 МПа; при изгибе: 2,7 МПа.



### **КНАУФ-Фуген ГВ**

Шпаклевка гипсовая универсальная

*Область применения:* КНАУФ-Фуген ГВ – сухая шпаклевочная смесь для внутренних работ на основе гипсового вяжущего с полимерными добавками. Предназначена для:

- заделки стыков КНАУФ-суперлистов (ГВЛ) или КНАУФ-суперпола (ЭП);
- сплошного шпаклевания поверхности КНАУФ-суперлистов;
- заделки сколов, глубоких царапин и мест крепления ГВЛ и ЭП.

По своему назначению может быть заменена только шпаклевочной смесью КНАУФ-Унифлот.



### **КНАУФ-Унифлот**

Шпаклевка гипсовая высокопрочная. Расход сухой смеси на 1 кв. м поверхности при шпаклевании стыков ГКЛ и мест установки шурупов составляет: для потолков - 0,3 кг, перегородок – 0,5 кг.

*Область применения:* КНАУФ-Унифлот – сухая шпаклевочная смесь для внутреннего применения на основе высокопрочного гипсового вяжущего с полимерными добавками. Предназначена для заделки стыков КНАУФ-листов (ГКЛ), КНАУФ-суперлистов (ГВЛ), КНАУФ-суперпола (элементы пола из ГВЛ) и КНАУФ-

Клинео с любыми видами кромок.





### **КНАУФ-ХП Старт**

Штукатурка гипсовая

*Область применения:* КНАУФ-ХП Старт – сухая штукатурная смесь на основе гипсового вяжущего с полимерными добавками. Предназначена для оштукатуривания ручную стен (кирпичная кладка, цементная штукатурка, пористый и плотный бетон) в один слой от 10 мм до 30 мм внутри помещений.

*Технические характеристики:*

- Толщина штукатурного слоя минимальная: 10 мм; максимальная: 30 мм
- Расход сухой смеси при слое 10 мм: 10 кг/м<sup>2</sup>
- Высыхание слоя 15–20 мм при температуре 20°C и влажности воздуха 60%: ~ 7 суток.

*Условия проведения работы:*

Температура в помещении при проведении работ – не менее +10°C. Шпаклевание стыков КНАУФ-суперлистов следует производить при эксплуатационном температурно-влажностном режиме после завершения всех работ, связанных с его изменением, что исключает линейные деформации гипсокартонных листов. Например, если в помещении предусматривается устройство наливного пола или выравнивающей стяжки, то шпаклевание следует проводить после его высыхания.



### **КНАУФ-Файерборд Шпатель**

Шпаклевка гипсовая огнестойкая

КНАУФ-Файерборд Шпатель –

Сухая шпаклевочная смесь для внутреннего применения на основе гипсового вяжущего с полимерными добавками. Предназначена для:

- заделки ручную стыков негорючих плит КНАУФ-Файерборд с использованием стекло-волоконной армирующей ленты;
- заделки возможных повреждений плит КНАУФ-Файерборд;
- шпаклевания поверхности плит КНАУФ-Файерборд для получения высококачественной поверхности под покраску, обои и другие декоративные покрытия.

Не применять для заделки стыков гипсокартонных листов.

## 5.5.2 Сухие строительные смеси на цементной основе



### КНАУФ Мульти-финиш

Шпаклевка цементная фасадная. Расход 1,2 кг на 1 квадратный метр при толщине 1 мм.

*Область применения:* Шпаклевка КНАУФ Мульти-финиш – сухая смесь на основе цемента с заполнителем и полимерными добавками. Применяется для наружных и внутренних работ. Предназначена для выравнивания поверхностей бетона и цементных штукатурок, например, КНАУФ-Грюнбанд, КНАУФ-Унтерпутц и КНАУФ-Зокельпутц, на фасадах зданий и в помещениях с повышенной влажностью, для ремонта, заделки

трещин, заполнения отверстий.

*Технические характеристики:*

- Жизнеспособность раствора: не менее 3 часов
- Время высыхания около 3 суток (в зависимости при +10°C от толщины слоя и 1 сутки и вентиляции): при +20°C
- Толщина слоя при сплошном выравнивании: 1–3 мм
- Толщина слоя при частичном выравнивании: 5 мм
- Морозостойкость: не менее 25 циклов
- Цвет: серый.



### КНАУФ-Грюнбанд

Штукатурка цементная теплоизоляционная фасадная. Расход 12 кг на 1 квадратный метр при толщине 10 мм.

*Область применения:* КНАУФ-Грюнбанд – сухая штукатурная смесь на основе цемента с легким заполнителем и специальными добавками. Обладает высокой трещиностойкостью и теплоизолирующей способностью. Применяется для наружных и внутренних работ.

Предназначена для оштукатуривания поверхностей стен с теплоизоляционной каменной и кирпичной кладкой (газо- и пенобетон), а также обычных оснований из керамического и силикатного кирпича, бетона и т.д., под последующее нанесение на них

декоративных покрытий (декоративной штукатурки, например, КНАУФ-Диамант, облицовочной плитки и т.п.).

Легко наносится, паропроницаема, не растрескивается, усиливает теплоизоляционные свойства стен, обеспечивает длительную защиту фасадов от атмосферных воздействий. Может наноситься вручную и с помощью штукатурных машин, например, фирмы PFT, оборудованных шнековой парой D6-3.

*Технические характеристики:*

- Толщина одного слоя: 10–30 мм
- Максимальный размер фракции: до 1,5 мм
- Плотность: < 1100 кг/м<sup>3</sup>
- Прочность при сжатии: > 3,4 МПа
- Коэффициент паропроницаемости, m: 0,1 мг/м•ч•Па
- Теплопроводность: < 0,35 Вт/м•°С
- Морозостойкость: 100 циклов (по ГОСТ 10060.3-95)



### **КНАУФ-Унтерпутц**

Штукатурка цементная фасадная. Расход 17 кг на 1 квадратный метр при толщине 10 мм.

*Область применения:* КНАУФ-Унтерпутц – сухая штукатурная смесь на основе цемента с фракционированным песком и специальными добавками. Применяется для наружных и внутренних работах. Предназначена для оштукатуривания фасадов зданий, поверхностей в помещениях с повышенной влажностью (подвалы, гаражи и т.п.), для выравнивания оснований под облицовку плиткой, природным камнем или декоративную штукатурку, например, КНАУФ-Диамант. Может наноситься

вручную или с помощью штукатурных машин, например, фирмы PFT, оборудованных шнековой парой D6-3.

*Технические характеристики:*

- Толщина штукатурки общая: 10–35 мм, максимальная одного слоя: 20 мм, минимальная: 10 мм.
- Максимальный размер фракции: до 1,5 мм
- Водоудерживающая способность: не менее 98%
- Жизнеспособность раствора: 1,5–2,0 часа
- Прочность при сжатии:  $\geq 2,5$  МПа
- Коэффициент паропроницаемости:  $\geq 0,1$  мг/ (м•час•Па)
- Морозостойкость: 150 циклов.



### **КНАУФ-Зокельпутц**

Штукатурка цементная цокольная. Расход 17 кг на 1 квадратный метр при толщине 10 мм.

*Область применения:* КНАУФ-Зокельпутц – сухая штукатурная смесь на основе цемента с фракционированным песком и специальными добавками.

Обладает повышенной прочностью. Применяется при наружных и внутренних работах. Предназначена для оштукатуривания цоколей и фасадов зданий, поверхностей в помещениях с повышенной



влажностью

подвалы, гаражи и т.п.), для выравнивания оснований под облицовку плиткой, природным камнем или декоративную штукатурку, например, КНАУФ-Диамант. Может наноситься вручную или с помощью штукатурных машин, например, фирмы PFT, оборудованных шнековой парой D6-3.

*Технические характеристики:*

- Толщина штукатурки общая: 10-35 мм, максимальная одного слоя: 15 мм, минимальная: 10 мм
- Максимальный размер фракции: до 1,5 мм
- Водоудерживающая способность: не менее 98%
- Жизнеспособность раствора: 1,5–2,0 часа
- Прочность на сжатие:  $\geq 7,5$  МПа
- Коэффициент паропроницаемости:  $\geq 0,1$  мг/(м•час•Па)
- Морозостойкость: 200 циклов.



### **КНАУФ-Диамант**

Штукатурка цементная декоративная. Расход 3,8 кг на 1 квадратный метр.

*Область применения:* КНАУФ-Диамант – минеральная структурная штукатурка на цементной основе с полимерными добавками и пигментами различных цветов, обладающая водоотталкивающими свойствами,

устойчива против неблагоприятных погодных условий, для наружных и внутренних работ. При обработке в зависимости от инструмента и консистенции раствора образуется шероховатая (зернистая) или бороздковатая структура, которая может окрашиваться. Применяется при оштукатуривании фасадов зданий и в помещениях с повышенной влажностью по поверхности стен и потолков из цементных штукатурок, например, КНАУФ-Унтерпутц, КНАУФ-Зокельпутц, КНАУФ-Грюнбанд, и бетона, а также в системах наружной теплоизоляции зданий по армирующему слою раствора штукатурно-клеевой смеси КНАУФ-Северен внутри помещений по гипсовой штукатурке КНАУФ-Ротбанд, КНАУФ-Гольдбанд, КНАУФ-МП-75, гипсокартонным листам и т.п. Может наноситься вручную и с помощью штукатурных машин, например, фирмы PFT, оборудованных шнековой парой D4-3 и домешивателем Rotomix-D.

*Подготовка поверхности основания:*

Основание под штукатурку должно быть чистым, без пыли, грязи или посторонних частиц. При необходимости следует произвести очистку (например, струей воды под давлением). Восприимчивые к загрязнению смежные строительные элементы, такие как натуральное дерево, стекло, алюминий, природный камень, покрытия пола накрыть или оклеить

водонепроницаемыми покрытиями. Перед нанесением КНАУФ-Диамант поверхность основания следует грунтовать:

– цементные штукатурки – грунтовкой КНАУФ-Изогрунд или КНАУФ-Кварцгрунд;

– гипсовые штукатурки – грунтовкой КНАУФ-Кварцгрунд;

– гипсокартонные листы и бетон – грунтовкой КНАУФ-Путцгрунд.

После нанесения дать грунтовке высохнуть: КНАУФ-Изогрунд (24 часа), КНАУФ-Кварцгрунд (24 часа), КНАУФ-Путцгрунд (24 часа).

*Технические характеристики:*

- Размер зерна: < 3 мм

- Прочность при сжатии: > 3,5 МПа

- Коэффициент паропроницаемости,  $m$ : 0,1 мг/м<sup>2</sup>•ч•Па

- Водопоглощение: < 15 %

- Морозостойкость: > 50 циклов.



### **КНАУФ-Адгезив**

Штукатурка цементная адгезионная для обрызга. Расход 5 - 8 кг на 1 квадратный метр.

*Область применения:* КНАУФ-Адгезив – сухая смесь на основе цемента, известнякового и кварцевого заполнителя с размером гранул 0,1 – 0,4 мм и химических добавок, обеспечивающих повышенную клеящую способность.

Применяется для предварительной обработки таких оснований, как бетон, бутовый камень, силикатный кирпич, старая кирпичная кладка, смешанная кладка, перед нанесением выравнивающих штукатурок КНАУФ-Грюнбанд, КНАУФ-Унтерпутц, КНАУФ-

Зокельпутц.

Исключает необходимость армирования основания металлической сеткой. Создает шероховатую поверхность и регулирует впитывающую способность штукатурных оснований с неравномерной или высокой гигроскопичностью. После

затвердения и высыхания слой обрызга морозостоек. Смесь предназначена для наружных и внутренних работ. Наносится вручную или с помощью штукатурных машин, например, фирмы PFT, оборудованных шнековой парой Д6-3.

*Технические характеристики:*

- Плотность (в сухом состоянии): ~1600 кг/м<sup>3</sup>

- Прочность при сжатии:  $\geq 7,5$  МПа

- Коэффициент паропроницаемости:  $\geq 0,1$  мг/(м<sup>2</sup>•час•Па)

- Водопоглощение: < 15%

- Морозостойкость: 150 циклов.

## 5.6 Контрольные вопросы:

1. Определение строительного раствора?
2. Сырьевые материалы для приготовления растворных смесей?
3. Классификация растворов по плотности?
4. Классификация растворов по виду вяжущего?
5. Свойства растворов?
6. Определение сухих строительных смесей?
7. Область применения Кнауф-ротбанд?
8. Подготовка поверхности при работе со штукатуркой Диамант?
9. Технические характеристики цементной штукатурки Зокельпутц?
10. Расход штукатурки Грюнбанд на 1 квадратный метр при толщине в 10 мм?

## РАЗДЕЛ 6. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

### 6.1 Общие сведения о теплоизоляционных материалах

Энергоэффективность строительных объектов обеспечивается созданием надежной теплоизоляции (рисунок 6.1).



Рисунок 6.1 – Основные виды потерь тепла и способы теплоизоляции здания

Теплопередача – процесс теплообмена между телами через разделяющую стенку. Способы переноса тепла:

- теплопроводность – внутри тела от более нагретых к менее нагретым частицам; коэффициент теплопроводности,  $\lambda$ , Вт/(м·0С) или Вт/(м·К); характерна для всех веществ в любом состоянии;

- конвекция – перемещение и перемешивание частиц, имеющую разную температуру; характерна для движущихся жидкостей и газов;

- тепловое излучение – обмен теплом между телами, находящимися на расстоянии посредством лучистой энергии (электромагнитные волны); происходит в газовой среде, в вакууме.

Цель теплоизоляции – ограничить количество передаваемого тепла. Любое ограждение оказывает некоторое сопротивление переходу тепла. Однако для достижения значительного теплосопротивления необходимы ограждения большой толщины, что экономически нецелесообразно, либо применяют теплоизоляционные материалы, позволяющие уменьшить толщину ограждения (рисунок 6.2).

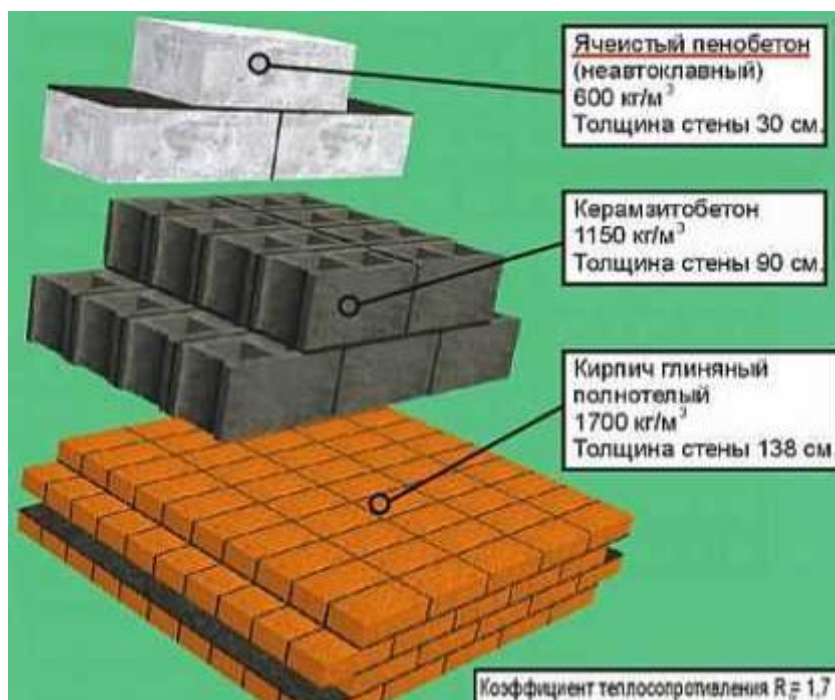


Рисунок 6.2 – Влияние вида материала на толщину стены

Теплоизоляционные материалы (ТИМ) – имеют высокопористую; средняя плотность не более 600 кг/м<sup>3</sup>; коэффициент теплопроводности  $\lambda$  не более 0,175 Вт/(м·0С).

Назначение: теплоизоляция строительных конструкций, технологической аппаратуры, трубопроводов.

Малая теплопроводность этих материалов объясняется наличием большого количества пор, заполненных воздухом, который в неподвижном состоянии является плохим проводником тепла. Отличительная особенность строения теплоизоляционных материалов – высокая пористость.

Классификация ТИМ:

- структура (ячеистые, зернистые, волокнистые, комбинированные);
- вид сырья (органические, минеральные, смешанные);
- форма (штучные; сыпучие; рулонные и шнуровые);
- средняя плотность (особо легкие, легкие, средней плотности, плотные);
- теплопроводность (низкая, средняя, повышенная).

Штучные изделия: плиты, блоки, кирпич, полуцилиндры, сегменты.

Рулонные и шнуровые: маты, шнуры, жгуты.

Рыхлые и сыпучие – минеральные и органические вещества в виде бесформенных волокнистых или зернистых порошкообразных масс, например, вата минеральная, стеклянная, вспученный перлит и вспученный вермикулит, пеностекло, силипор. Сыпучие теплоизоляционные материалы в сухом состоянии используют для засыпки пустот в стенах временных и других облегченных зданий, для утепления чердачных перекрытий. Неорганические сыпучие материалы применяют и для тепловой изоляции

различного промышленного оборудования. К сыпучим материалам относят также некоторые порошкообразные смеси, которые в виде мастик употребляют для теплоизоляции горячих поверхностей оборудования.

Наиболее прогрессивные теплоизоляционные материалы – штучные изделия. Теплозащитные свойства ограждений из них лучше, чем у засыпных или мастичных теплоизоляционных конструкций. Штучные изделия изготовляют в заводских условиях по установленной технологии, а качество их контролируют по соответствующим нормативам. Теплозащитные свойства засыпных и мастичных изоляций зависят не только от свойств материалов, но и от способов применения, свойства засыпной теплоизоляции меняются в процессе эксплуатации.

Общие характеристики ТИМ:

- теплопроводность (таблица 6.1);
- средняя плотность;
- пористость (объем, виды, строения);
- температура применения;
- прочность;
- долговечность (возгораемость, биостойкость, водопоглощение).

Таблица 6.1 – Классификация изделий по теплопроводности

Класс по теплопроводности	Теплопроводность при температуре 25°C	
	Вт/(м·°C)	Ккал/(м·ч°С)
Низкая	до 0,06	до 0,05
Средняя	0,060 – 0,115	0,05–0,10
Повышенная	0,115 – 0,175	0,10– 0,15

Факторы, влияющие на теплопроводность материалов:

- физическое состояние (повышенный  $\lambda$  характерен для крупных кристаллов; для положения вдоль волокон);
- строение (зависимость  $\lambda$  от объема, характера пор);
- состав ( $\lambda$  снижается при усложнении состава и строения молекул, наличии примесей; для органических веществ);
- условия эксплуатации ( $\lambda$  возрастает при увеличении влажности, повышении температуры).

За основу подразделения теплоизоляционных материалов на марки принята средняя плотность материала в сухом состоянии (кг/м<sup>3</sup>). Марку обозначают D, например, D 15 (таблица 6.2). Марку материалов, имеющих промежуточное значение средней плотности, относят к ближайшему показателю.

Таблица 6.2 – Марки теплоизоляционных материалов

Группа материалов	Марка D (кг/м <sup>3</sup> )				
	15	25	35	50	75
Особо низкой плотности	15	25	35	50	75
Низкой плотности	100	125	150	175	–
Средней плотности	200	225	250	300	350
Плотные	400	450	500	600	–

По жесткости теплоизоляционные изделия подразделяют, исходя из относительной деформации сжатия (таблица 6.3).

Таблица 6.3 – Классификация изделия по жесткости

Вид изделий	Относительное сжатие, %, при удельной нагрузке, МПа		
	0,02	0,04	0,1
Мягкие	более 30	–	–
Полужесткие	от 6 до 30	–	–
Жесткие	до 6	–	–
Повышенной жесткости	–	до 10	–
Твердые	–	–	до 10

Пористость характеризует долю (процентное содержание) газовой (воздушной) фазы в объеме материала. Принято подразделять пористость на истинную, кажущуюся и закрытую.

Истинная (общая) пористость  $\Pi_i$  характеризует отношение общего объема всех пор к объему материала (в долях или процентах):  $\Pi_i = \Pi_z + \Pi_k$  или  $\Pi_i = (1 - \rho_0 / \rho) \cdot 100$ , где  $\rho$  – плотность;  $\rho_0$  – средняя плотность.

Кажущаяся (открытая) пористость  $\Pi_k$  – отношение общего объема сообщающихся пор к объему материала.

Закрытая пористость  $\Pi_z$  характеризует объем закрытых пор в объеме материала:  $\Pi_z = \Pi_i - \Pi_k$

Для зернистых материалов (засыпной теплоизоляции) для описания межзерновой пористости введено понятие пустотности  $V_{п.м.}$ :

$$V_{п.м.} = (1 - \rho_n / 1000 \cdot \rho) \cdot 100\%, \text{ где } \rho_n \text{ – насыпная средняя плотность.}$$

Истинную пористость теплоизоляционных материалов определяют обычно расчетным путем исходя из значений плотности и средней плотности материала. Открытую пористость оценивают экспериментальными методами по объему пор, заполненных водой. Закрытую пористость рассчитывают по показателям истинной и открытой пористости. Большое влияние на свойства теплоизоляционного материала оказывает вид пористой структуры. Характеристические значения пористости для теплоизоляционных материалов различной структуры приведены в таблице 6.4.



Объем истинной пористости зависит от содержания в материале твердой фазы, которая определяет механические, в значительной степени эксплуатационные свойства изделий. Поэтому превышение рациональных значений общей пористости приводит к резкому снижению прочностных и увеличению деформативных показателей материала. Оптимальное содержание твердой фазы в теплоизоляционных изделиях зависит от прочности и характера распределения структурообразующего материала. Чем выше его прочность и степень омоноличивания (связанность), тем больше может быть истинная пористость теплоизоляции

Таблица 6.4 – Классификация материалов по пористости

Структура	Материалы	Пористость, %		
		общая	открытая	закрытая
Ячеистая	Ячеистый бетон	85 – 90	40 – 50	40 – 45
	Пеностекло	85 – 90	2 – 5	83 – 85
	Пенопласты	92 – 99	1 – 55	45 – 98
Волокнистая	Минераловатные	85 – 92	85 – 92	0
Зернистая	Перлитовые	85 – 88	60 – 65	22 – 25
	Стеклопоровые	92 – 99	60 – 65	30 – 35

Для материалов с волокнистой и зернистой структурой значения истинной пористости не являются величиной постоянной, так как даже под небольшой нагрузкой вследствие сжимаемости и уплотнения  $\Pi$  снижается; при снятии нагрузки у волокнистых материалов, возможно, некоторое увеличение  $\Pi$ . На свойства теплоизоляционных материалов большое влияние оказывают размеры, форма и расположение пор. Лучшие показатели теплоизолирующей способности имеют материалы с мелкими замкнутыми сферическими порами. С увеличением размеров пор и превращением их в открытые каналы ухудшаются теплозащитные свойства материалов, так как воздух, заключенный в порах, свободно перемещается и теплопроводность материалов ухудшается. Такие материалы легко увлажняются, что также ухудшает их свойства.

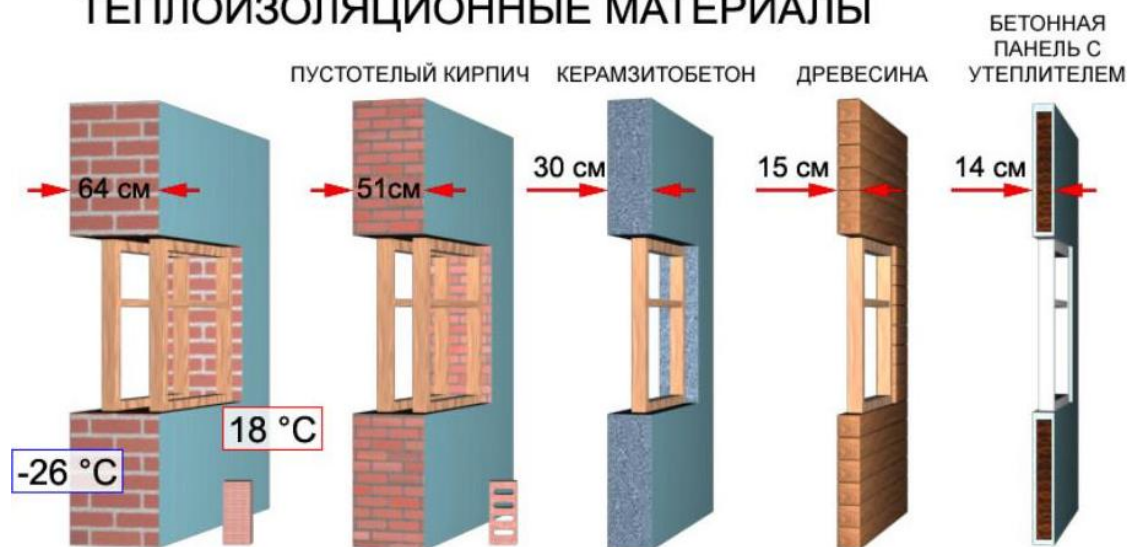
Размер пор у различных теплоизоляционных материалов колеблется в широких пределах, но не превышает 3 – 5 мм. Материалы волокнистой структуры характеризуются преимущественно сквозными каналами, и определить размеры их пор трудно. Характер, размеры и количество пор во многом зависят от способов получения высокопористого материала.

Форма пор во многих случаях является причиной анизотропии свойств теплоизоляционных материалов. Так для изделий с порами эллиптической формы прочность и теплопроводность зависят от направления приложения нагрузки и температурного поля. Если нагрузка действует вдоль оси эллипса, то прочность бетона выше, чем при нагружении в перпендикулярном направлении. Для теплопроводности наблюдается обратная зависимость.



Рынок современных теплоизоляционных материалов весьма широк, однако эффективность их использования неодинакова (рисунок 6.3).

## ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ



ШКАЛА ТОЛЩИНЫ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДИНАКОВОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ



Строительные материалы	Толщина слоя, соответствующая нормам СНиП для Московского региона, мм			Характеристики материала			
	Стен	Перекрытий чердачных и над подвалами	Кровель	в сухом состоянии		во влажном состоянии	
				Плотность $\gamma_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Коеф. теплопроводности $\lambda_0$ , Вт/(м·град·С)	Коеф. теплопроводности $\lambda_v$ , Вт/(м·град·С)	Коеф. паропроницаемости $\mu$ , мг/(м·ч·Па)
$R_{req}$ М <sup>2</sup> ·°С/Вт	3.2	4.2	4.8				
Пенополиуретан (ППУ) Penoglas	61	81	93	35-45	0,020	0,021	0,018
Экструдированный пенополистирол	91	121	139	32-45	0,033	0,039	0,015
Пенополистирол (пенопласт)	122	162	186	15-25	0,039	0,043	0,050
Мин. вата	143	190	218	30-180	0,047	0,058	0,590
Сосна и ель (вдоль волокон)	548	728	836	500	0,180	0,350	0,320
Кирпичная кладка	1704	2264	2600	1800	0,560	0,810	0,110
Керамзитобетон	1430	1900	2182	1400	0,470	0,650	0,098
Блоки из пенобетона	517	687	789	600	0,170	0,290	0,130
Железобетон	5141	6831	7845	2500	1,690	2,040	0,030

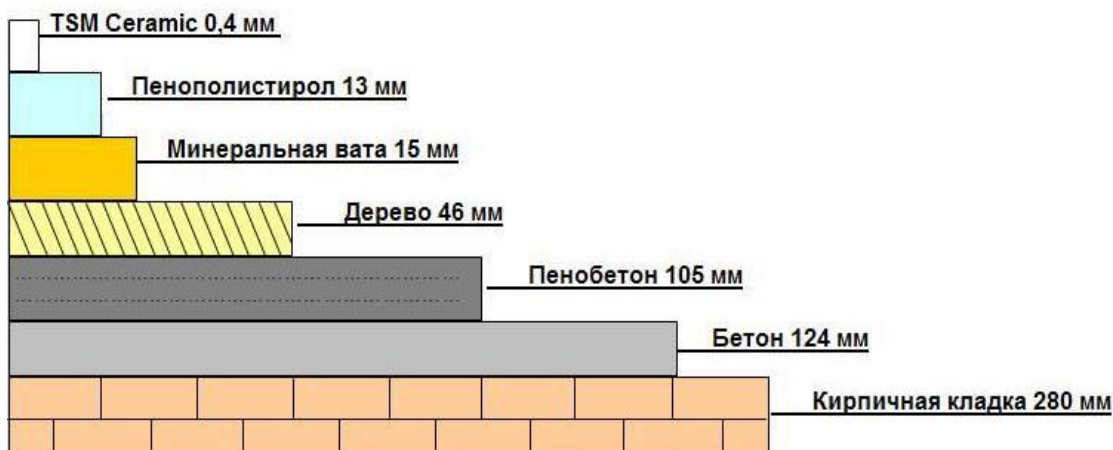


Рисунок 6.3 – Сравнительная характеристика теплоизоляционных материалов

## 6.2 Характеристика основных теплоизоляционных материалов

### 6.2.1 Минеральная вата и изделия на ее основе

Минеральная вата (МВ) – бесформенная волокнистая масса, состоит из частиц длиной 2 – 3 мм (до 20 – 30 см), диаметром 1 – 10 мкм (6 – 8 мкм).

МВ получают из силикатного расплава, для образования которого используют сырье:

- природное (габбро, базальты, амфиболиты, граниты, мергели, диатомиты, известняки);
- техногенное (металлургические шлаки – жидкие и гранулированные; отходы силикатных производств).

Цвет зависит от химического состава; размеры волокон – от состава расплава и технологии изготовления.

Количество «корольков» – неволокнистых включений – не более 12 – 25 % (с учетом марки ваты). Свойства: пористость 95 – 98 %; средняя плотность 75 – 125 кг/м<sup>3</sup>; коэффициент теплопроводности 0,045 Вт/(м·0С); температура применения 600 – 700 0С; водопоглощение до 600 %.

Преимущества: доступность сырья; невысокая себестоимость; негорючесть; возможность получения разнообразия изделий.

Недостатки: нестабильность формы, высокое водопоглощение, низкие механические характеристики, энергоемкость производства.

Применение МВ в рыхлом виде нецелесообразно по ряду причин: уплотнение при транспортировке, хранении; трудоемкость и антигигиенические условия укладки; высокая деградация в конструкциях.

Классификация минераловатных изделий (МВИ):

- форма: плоские – (плиты, маты, войлок), рулонные (маты), фасонные (цилиндры, скорлупы, сегменты), шнуровые (жгуты, шнуры), сыпучие (гранулы);

- наличие связующего: прошивные (без связующего), на основе связующего;

- сжимаемость под нагрузкой (0,02 МПа): мягкие М, полужесткие ПП, жесткие Ж, повышенной жесткости ППЖ, твердые Т.

Средняя плотность 50 – 300 кг/м<sup>3</sup>. Сжимаемость 0,015 – 35 %.

Температура применения «–» 100... «+» 60 (300, 600, 700) 0 С – в зависимости от вида связующего.

Грануляция ваты дает сыпучесть и облегчает укладку в конструкции, удаляются корольки, снижается плотность; недостатки как у рыхлой минеральной ваты.

Шнуры получают путем набивки измельченной ваты в оплетку из металл-ческой проволоки, стеклянных или хлопковых нитей.

Прошивные маты изготавливают путем обкладки слоя минеральной ваты гибкими материалами в виде металлической сетки, асбестовой, стеклянной ткани, водонепроницаемой бумаги.

Остальные виды изделий получают с использованием связующего. Связующее скрепляет волокна и создает каркас различной жесткости, в зависимости от его количества и вида. В качестве связующих используют синтетические смолы, композиционные и битумные связующие. Изделия из минеральной ваты приведены на рисунке 6.4.



Рисунок 6.4 – Минераловатные изделия

## 6.2.2 Пеностекло

Пеностекло (ячеистое стекло) – высокопористый материал ячеистой дву模альной структуры; многофункционального назначения:

- теплоизоляционное;
- декоративно-акустическое;
- облицовочное;
- гранулированное.

Пеностекло получают спеканием тонкоизмельчённого стекольного порошка и порообразователя (кокс, мел и другие). Легкий пористый материал, строение которого напоминает твердую пену. Размер ячеек пены может быть от долей миллиметра до сантиметра. Пористость регулируется изменением химического состава сырья, видом порообразователя, концентрацией и дисперсностью порообразователя, режимом спекания.

Цвет материала от светло-кремового до черного (обычно зеленовато-серый), но в зависимости от состава стекла и примесей может приобретать практически любые цвета.

Пористость 80 – 95 %. Размер пор 0,1 – 5 мм. Поры преимущественно замкнутые, мелкие, равномерно распределены в материале. Средняя плотность 100 – 800 кг /м<sup>3</sup>. Теплопроводность 0,055 – 0,85 Вт/(м °С).

Благодаря ячеистой структуре и свойствам стекла пеностекло является жестким и безусадочным материалом. Предел прочности при сжатии 0,5 – 7,5 МПа. Высокий ККК.

Водопоглощение 1 – 10 % (замкнутые поры). Температура применения до 600 °С и до 1200 °С (высокремнеземистое). Предел огнестойкости по потере теплоизолирующей способности при толщинах 40, 80 и 100 мм составляет соответственно 30, 45 и 60 мин.

Пеностекло нерастворимо в воде, устойчиво к действию большинства кислот и органических растворителей, инертно во всех средах за исключением растворов сильных щелочей и плавиковой кислоты. Коэффициент водостойкости (размягчения) пеностекла близок к 0,95, что соответствует характеристикам гранита.

Основные уникальные свойства пеностекла в сравнении с традиционными теплоизоляционными материалами заключаются в низкой теплопроводности при высокой прочности и удобстве обработки и монтажа при экологической безопасности и долговечности. Легко поддается механической обработке.

Изделия из пеностекла (плиты, блоки, гранулы) применяют для изоляции строительных конструкций, промышленного оборудования, трубопроводов, холодильных установок; для звукопоглощения; для фильтрации склеиванию (рисунок 6.5). Применяется для теплоизоляции, как плавучий материал. Из пеностекла с открытыми порами изготавливают фильтры для кислот и щелочей.

Пеностекло исключительно эффективно для заполнения внутренних и наружных стен зданий; для защиты зернохранилищ, хозяйственных и жилых



помещений, не разрушается грызунами и насекомыми. В условиях со значительными перепадами температур и высокой влажностью пеностекло наиболее долговечно, практически не имеет ограничений по срокам эксплуатации. Поскольку наружная поверхность материала состоит из множества разрезанных ячеек, то пеностекло легко и прочно клеится мастиками. Экологическая безопасность пеностекла делает его пригодным для любых видов строительства.



Рисунок 6.5 – Виды пеностекла

### 6.2.3 Ячеистые бетоны

Ячеистые бетоны – искусственные материалы с характерной равномерно распределенной мелкодисперсной ячеистой структурой, полученные в результате затвердевания рационально подобранной, тщательно перемешанной формовочной массы.

Формовочная масса (ячеистобетонная смесь) составлена из вяжущего вещества, кремнеземистого компонента, воды, порообразователя и добавок. Смесь компонентов до введения порообразователя – растворная смесь.

Известно множество разновидностей ячеистого бетона, которые можно классифицировать по следующим основным признакам.

По функциональному назначению. Выделяют три вида ячеистого бетона:

- теплоизоляционный – со средней плотностью 200 – 500 кг/м<sup>3</sup>, применяющийся для утепления стен, полов, чердаков, мансард, крыш, установок;

- теплоизоляционно-конструкционный – со средней плотностью более 500 до 1000 кг/м<sup>3</sup>, применяющийся для устройства наружных и внутренних стен, перегородок малоэтажных зданий;

- конструкционный – со средней плотностью 1000 – 1200 кг/м<sup>3</sup>, применяющиеся для устройства несущих внутренних стен, плит покрытий и перекрытий; изделия из такого бетона могут заменять кирпич, бетонные блоки и другие виды стеновых материалов в малоэтажных зданиях и каркасном строительстве. Это обеспечивает снижение материалоемкости зданий в 1,5:2 раза.

По способу поризации. Образование макроструктуры ячеистого бетона осуществляется следующими способами:

- газопоризацией – поризация с использованием выделяемого газа при химическом взаимодействии специально вводимого газообразователя с компонентами смеси (газобетоны, газосиликаты и другие);

- пенопоризацией – насыщение воздухом растворной смеси; осуществляют смешиванием поризуемого раствора с заранее приготовленной пеной (традиционный способ), введением в пену тонкодисперсных сухих компонентов смеси (сухая минерализация), аэрированием – поризация смеси при совместном интенсивном перемешивании всех компонентов смеси с образованием ячеистой структуры за счет воздухововлечения (пенобетоны, пеносиликаты и другие);

- пеногазопоризацией – комбинированный способ поризации раствора, сочетающий метод аэрирования смеси с пенообразователем и газопоризации за счет использования газа, выделяемого при химическом взаимодействии специально вводимого газообразователя с компонентами смеси в поризуемую смесь; на каждой стадии образования ячеистой структуры используют два принципиально различных способа для получения пористой структуры (пеногазобетоны).

Структура ячеистых бетонов включает поры – ячейки со средним размером 0,5 – 2,0 мм. Ячеистая пористость бетонов – результат направленных технологических воздействий на бетонную смесь, в первую очередь, введения порообразователя. Наличие мелких сферических замкнутых пор, равномерно распределенных в объеме бетонной смеси, обеспечивает низкую плотность и высокие теплозащитные свойства бетона.

Ячеистые бетоны характеризуются следующими усредненными техническими показателями:

- средняя плотность 200 – 1200 кг/м<sup>3</sup>;
- пористость 60 – 85 %;
- коэффициент теплопроводности 0,07– 0,3 Вт/(м•0С);
- предел прочности при сжатии 0,3 – 15,0 МПа;
- водопоглощение 20 – 35 %;
- морозостойкость 35 – 50 циклов.

Средняя плотность ячеистых бетонов находится в тесной связи с пористо-стью: чем выше пористость, тем ниже их средняя плотность.

Средняя плотность ячеистого бетона определяется плотностью межпорового материала и общим объемом пустот, образовавшихся в результате воздухововлечения, искусственной поризации массы и испарения воды затворения.

В зависимости от средней плотности ячеистые бетоны делят на марки: D200; D250; D300; D350; D400; D450; D500; D600; D700; D800; D900; D1000; D1100; D1200.

Поскольку пористость ячеистого бетона определить труднее, чем среднюю плотность, то чаще при оценке свойств материала фигурирует именно средняя плотность (таблица 6.5).

Таблица 6.5 – Свойства ячеистых бетонов различной плотности

Марка бетона по средней плотности	D300	D400	D500	D600	D 700	D 800	D 900	D1000	D1100	D1200
Теплопроводность бетона в сухом состоянии, Вт/(м·К), не более	0,08	0,09	0,1	0,13 – 0,14	0,15	0,18	0,20	0,23	0,26	0,29
	– 0,09	– 0,1	– 0,12		– 0,18	– 0,21	– 0,24	– 0,29	– 0,34	– 0,38
Паропроницаемость, г/м ч Па, не менее	0,035	0,030	0,026	0,023	0,020	0,018	0,016	0,015	0,014	0,013
	– 0,031	– 0,027	– 0,024	– 0,021	– 0,018	– 0,016	– 0,014	– 0,013	– 0,011	– 0,011

Теплопроводность ячеистых бетонов зависит от общей пористости, от размера, формы, характера пор, фазового состава наполнителя, влажности материала. Решающим фактором снижения теплопроводности ячеистого



бетона является повышение общей пористости. Снижение средней плотности на  $100 \text{ кг/м}^3$  приводит к уменьшению теплопроводности на 20% .

Теплопроводность линейно повышается с увеличением влажности до 10 – 15%. Дальнейшее увеличение влажности в меньшей степени отражается на теплопроводности бетона. Большое влияние на теплопроводность оказывает температура материала, в порах которого находятся вода, воздух и водяной пар. При температуре менее  $60^\circ\text{C}$  теплота передается в основном за счет теплопроводности воды, а при температуре более  $60^\circ\text{C}$  основным фактором теплопередачи является водяной пар. При полном насыщении бетона водой теплопроводность зависит от теплопроводностей сухой твердой фазы и воды при данной конкретной температуре.

Высокая пористость ячеистых бетонов обуславливает требуемую паропроницаемость, высокие значения водопоглощения и гигроскопичности.

Паропроницаемость ячеистых бетонов – свойство пропускать насыщенный влажный воздух или пар под действием перепада (разницы) парциальных давлений водяного пара в воздухе на внутренней и наружной поверхности слоя материала. Давление воздуха с обеих сторон слоя материала при этом одинаковое. Благодаря паропроницаемости стены из ячеистых бетонов «дышат», обеспечивая благоприятный микроклимат в помещении.

Водопоглощение ячеистых бетонов при непосредственном контакте с водой может достигать 20 – 40 % (в зависимости от вида вяжущего, величины пористости и характера структуры), что приводит к значительному снижению прочности материала (на 30 – 40 %). Сорбционное увлажнение приводит к снижению прочности ячеистых бетонов и повышению их теплопроводности.

Благодаря наличию замкнутых пор в структуре водопоглощение ячеистого бетона значительно ниже, чем у других стеновых материалов с капиллярной структурой. Уменьшить водопоглощение ячеистых бетонов можно путем снижения водотвердого отношения, формирования структуры с мелкими, замкнутыми порами, введения в смесь гидрофобизирующих добавок, пропитки материала специальными веществами.

Отпускная влажность ячеистых бетонов не должна превышать 25% по массе на песке и 35% – на других кремнеземистых компонентах.

Прочностные свойства ячеистых бетонов зависят в большей степени от вида вяжущего и условий твердения. Наиболее прочным является автоклавный ячеистый бетон: его прочность превышает прочность ячеистых бетонов естественного твердения в 8 – 10 раз.

Установлены следующие марки ячеистых бетонов по прочности при сжатии: М 5; М 10; М 15; М 25; М 35; М 50; М 75; М 100; М 150; М 200.

Ячеистые бетоны должны иметь следующие классы по прочности при сжатии: В0,35; В0,5; В0,75; В1,0; В1,5; В2,0; В2,5; В3,5; В5; В7,5; В10; В12,5; В15; В17,5; В20 (таблица 6.6).

Для ячеистых бетонов характерна кубическая зависимость прочности от пористости и средней плотности: уменьшение средней плотности в 2 раза прочность снижается в 8 раз.

Морозостойкость определяют для ячеистых бетонов, предназначенных для изготовления изделий, подвергающихся переменному замораживанию и оттаиванию. Марки по морозостойкости ячеистых бетонов: F15; F25; F35; F50; F75; F100.

Несмотря на большое водопоглощение, ячеистые бетоны обладают сравнительно высокой морозостойкостью (до F100). Это определяется характером структуры. При высокой пористости и прочих равных условиях ячеистые бетоны при воздействии мороза медленнее промерзают и содержат до 50% резервных пор, не заполненных водой, которые способны принимать воду из соседних, заполненных водой пор, в которых вода превращается в лед. Кроме того, содержащиеся в материале поры разного размера тормозят развитие микротрещин, образующихся при давлении льда на стенки пор.

Существенное влияние на морозостойкость ячеистых бетонов оказывает структура камня и вид вяжущего, условия твердения. Ячеистые бетоны неавтоклавного твердения на цементе более морозостойкие, чем автоклавные бетоны на известково-кремнеземистом вяжущем.

Таблица 6.6 – Марки ячеистых бетонов различной плотности

Марка по средней плотности (D)	Марка по прочности при сжатии (M)	Класс по прочности при сжатии (B)	Марка по морозостойкости (F)	Водопоглощение, %
400	10	0,75	–	6 – 9
500	10	0,75	15	6 – 9
	15	1,00	15 – 25	
	25	1,50	15 – 35	
600	15	1,00	15 – 25	6 – 9
	25	1,50	15 – 25	
	35	2,50	35 – 75	
700	25	1,50	15 – 35	5 – 7
	35	2,50	15 – 50	
	50	3,50	15 – 75	
800	35	2,50	15 – 35	5 – 7
	50	3,50	15 – 50	
	75	5,00	15 – 75	

Усадка при высыхании ячеистых бетонов не должна превышать, мм/м: 0,5 – для конструкционных и конструкционно-теплоизоляционных ячеистых бетонов, изготовленных на кварцевом песке; 0,7 – для конструкционных и конструкционно-теплоизоляционных ячеистых бетонов, изготовленных на других видах кремнеземистых компонентов. Усадка при высыхании теплоизоляционных ячеистых бетонов не нормируется. Неавтоклавный бетон имеет большую усадку, чем автоклавный. Пеногипс и пеномагнезит практически не дают усадки. Для неавтоклавных бетонов усадка достигает 3 мм/м. Усадка приводит к появлению в поверхностных слоях ячеистых бетонов трещин, что снижает долговечность.

Возникновение усадочных трещин зависит от скорости развития усадочных деформаций. При малой скорости увеличения деформаций усадки напряжения, возникающие в ячеистом бетоне, успевают релаксировать вследствие ползучести материала, а поэтому трещины в нем не возникают.

Деформации влажности усадки ячеистого бетона обусловлены, главным образом, действием капиллярных сил и испарением межкристаллической воды силикатного камня. Карбонизационная усадка затухает и мало проявляется при невысокой влажности бетона (5 – 7 %). Поэтому снижение влажности материала приводит к уменьшению карбонизационной усадки. Особо пагубно влияет на ячеистый бетон попеременное насыщение его водой и высушивание.

Во всех случаях уменьшение усадки повышает трещиностойкость и долговечность ячеистых бетонов. Снизить величину усадки ячеистых бетонов можно за счет применения безусадочных цементов, цементов с малой энергией расширения или расширяющими добавками, снижения В/Т, введения в смесь суперпластификаторов, грубомолотого немолотого песка, волокнистых материалов, пропитки материала пленкообразующими составами.

Предельная температура применения цементных и силикатных ячеистых бетонов «+» 300 – 400°C. При нагревании этих материалов до «+» 200°C прочность повышается. При дальнейшем повышении температуры свыше «+» 400°C происходит дегидратация новообразований цементного камня, вследствие чего нарушается структура, резко снижается прочность ячеистых бетонов.

Максимально допустимая температура пеногипса составляет «+» 50°C.

Возможно получение ячеистого бетона с температурой применения до «+» 800°C. Для этого используют портландцемент, золу-унос ТЭС, пенообразователь и воду при твердении материала в естественных условиях.

Вследствие невысокой температуростойкости ячеистый бетон относится к изоляционно-строительным материалам и применяется для изоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Огнестойкость ячеистых бетонов выше, чем тяжелых, что связано с высокопористой структурой. Ячеистый бетон не горит и эффективно препятствует распространению огня, поэтому может применяться для кладки стен всех классов пожарной безопасности. Например, предел огнестойкости

без нарушения структуры материала стены, выполненной из блоков толщиной 100 мм, составляет 2 ч, при этом предел распространения огня равен 0 см.

Звукоизолирующая способность ячеистого бетона высокая. Например, звукоизоляция стен из ячеистого бетона плотностью 400 – 500 кг/м<sup>3</sup> характеризуется показателями в зависимости от толщины: при 100 мм – 35:37 дБ, 125 мм – 44:46 дБ, 150 мм – 55:57 дБ, 175 мм – 64:66 дБ. Это значительно выше аналогичных показателей ряда материалов современного строительства.

Технологичность в обработке изделий. Изделия из ячеистого бетона легко пилятся, режутся, строгаются, сверлятся и т.п. Простота обработки ячеистого бетона позволяет изготавливать строительные конструкции различной конфигурации, обрабатывать поверхность, прорезать каналы и отверстия под скрытую электропроводку и розетки, трубопроводы.

Технологичность в применении. Изделия из ячеистого бетона, благодаря своей пористой структуре и, соответственно, сравнительно малой средней плотности, можно производить и укладывать в виде стеновых блоков объемом более 10 кирпичей стандартного размера, что позволяет значительно снизить трудоемкость и стоимость работ при возведении стен зданий.

Экологичность. Ячеистый бетон – экологически чистый материал. Уровень радиоактивности ячеистого бетона значительно ниже всех допустимых пределов. Ячеистый бетон не выделяет токсичных веществ или вредных газов. Коэффициент экологичности, например, для стен из дерева равен 1,0; ячеистого бетона – 2,0; керамического кирпича – 10,0 и керамзитобетона 20,0.

Ячеистые бетоны – эффективный строительный материал, из которого изготавливают (рисунок 6.6): мелкие изделия теплоизоляционные; изделия мелкие звукопоглощающие; блоки мелкие стеновые; межкомнатные перегородки; блоки крупногабаритные неармированные; блоки крупногабаритные армированные; – панели стеновые; плиты покрытия; плиты перекрытия; перемычки брусковые, лотковые; лестничные ступени поворотные; теплоизоляционные вкладыши для стеновых ограждений; акустические плиты; скорлупы и короба для теплосетей.

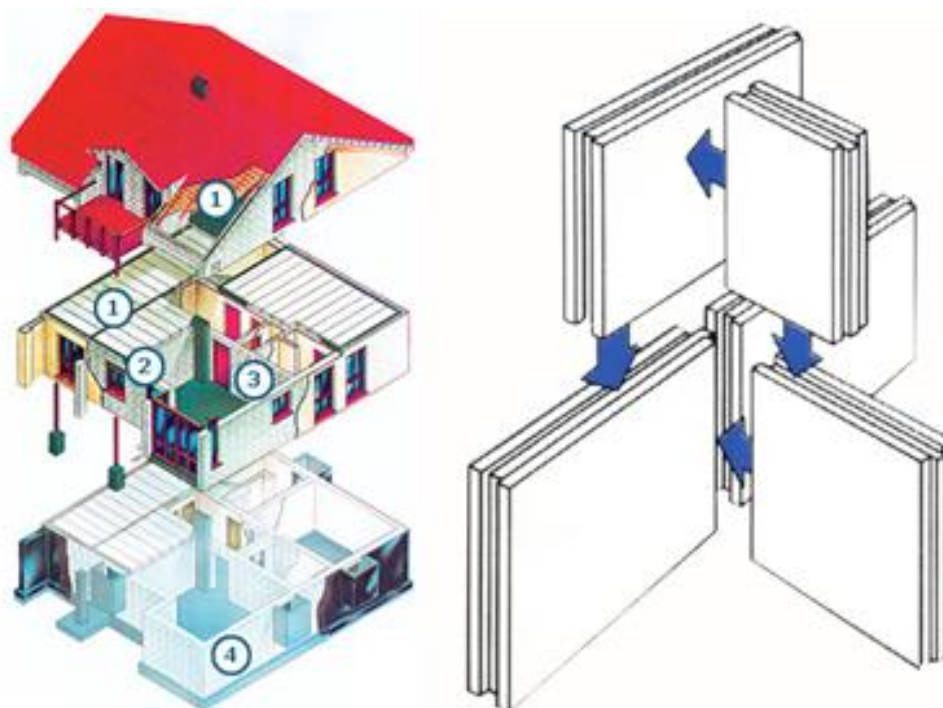


Рисунок 6.6 – Изделия из ячеистого бетона в жилищном строительстве

#### 6.2.4 Теплоизоляционные материалы на основе древесины

Основные разновидности материалов, содержащих в качестве заполнителя древесные частицы: древесноволокнистые плиты (ДВП), древесностружечные плиты (ДСтП), фибролитовые плиты, торфяные плиты, камышитовые и арболитовые изделия, эковата.

ДВП – листовый (плитный) материал, полученный прессованием древесной массы. Древесная масса – равномерно размолотая смесь волокон, пропитанная синтетическими смолами, и содержит некоторые добавки.

Структура – волокнистая. Волокна хаотично переплетаются.

По назначению: твердые и мягкие (теплоизоляционные).

Мягкие ДВП (1220...3660 × 1200...1600 × 8...25 мм) делят на марки по средней плотности, кг / м<sup>3</sup>: М – 1: 200 – 400; М – 2: 200 – 300; М – 3: 100 – 200.

Предел прочности при изгибе: 0,4 – 2,0 МПа. Влажность до 12 %. Водопоглощение до 34 %. Теплопроводность 0,04 – 0,08 Вт/(м·0С).

Назначение: звукоизоляционные перегородки, теплоизоляция стен, потолков.

ДСтП – плитный материал, получаемый горячим прессованием массы из древесных частиц и синтетического связующего.

Признаки различия ДСтП:

– способы прессования: плоское прессование (частицы параллельно расположены плоскости плит); экструзия – выдавливание в прессах (частицы расположены перпендикулярно плоскости плит);

– структура листа: одно -, трех – и многослойная;

– вид обработки поверхности: шлифованные и нешлифованные;

– вид отделки поверхности: необлицованные и облицованные (шпон, бумага, пластмасса, прессируемый порошок);

– средняя плотность 350 – 500 кг / м<sup>3</sup>; марка П – 1, П – 1М, П – 2; П – 3.

Размеры, мм: 2440 – 5500; 1220 – 2440; 10 – 25.

Влажность 8 ± 2 %. Предел прочности при изгибе 13 МПа.

Назначение: отделка поверхности потолков, пола, стен, перегородок.

Арболит – разновидность легкого бетона, получают в результате затвердевания смеси минерального вяжущего, древесного заполнителя, химических добавок и воды. Арболитовые изделия – стеновые блоки, панели, перегородки, теплоизоляционные плиты.

Вяжущее: портландцемент, ВВВ, гипс строительный и другие.

Древесный заполнитель: дробленка, костра, стружка, сечка и другие.

Химические добавки (хлорид кальция, жидкое стекло, сернокислый алюминий) – для нейтрализации «цементных ядов».

Средняя плотность 400 – 500 кг / м<sup>3</sup> (теплоизоляция).

Теплопроводность 0,08 – 0,17 Вт/(м·0С).

Предел прочности, МПа: при сжатии 0,5 – 3,5; при изгибе 0,7 – 1,0.

Фибролит – плитный материал из опрессованной древесной шерсти, склеенной затвердевшим вяжущим. Известно большое количество разновидностей фибролита, название которых отражает вид минерального вяжущего: магнезиальный, магнезиально-доломитовый, известковый, цементно-известковый, известково-трепельный, гипсовый, цементный. В настоящее время выпускают в основном цементный фибролит, который по назначению разделяют на теплоизоляционный, теплоизоляционно-конструкционный и акустический.

Плотность фибролита определяет марки: 300, 350, 400 и 500, причем выпуск марки 300 составляет около 80 % от общего выпуска.

Прочность фибролита существенно зависит от размера и качества древесной шерсти и определяется расходом вяжущего, усилием прессования, режимом тепловой обработки и составляет при изгибе 0,4 – 1,2 МПа.

Водостойкость фибролита недостаточна, поэтому необходима защита от увлажнения. При увлажнении фибролитовых плит до 50 % их механическая прочность снижается в 1,5 – 2 раза. Водопоглощение 35 – 60 %.

По теплопроводности фибролитовые теплоизоляционные плиты относят к среднему классу: от 0,079 до 0,115 Вт/(м·°С).

По огнестойкости фибролитовые плиты относят к трудносгораемым материалам – фибролит не горит, но тлеет.

В сухом состоянии фибролитовые плиты биостойки. не подвержены действию грызунов и грибов. Фибролит хорошо обрабатывается механическими способами, хорошо окрашивается и оштукатуривается.

Торфяные плиты, скорлупы, сегменты – выпускают из сфагнового торфа (сфагнум – белый мох). Для повышения качества изделий к торфяной массе во время варки иногда добавляют до 10 % древесного волокна.

Размеры плит, мм: 12000 × 500 × 30. Плиты обыкновенные, водостойкие (В), биостойкие (Б), трудносгораемые (Т).

Средняя плотность – не более 170 кг/м<sup>3</sup>; теплопроводность 0,05 – 0,07 Вт/(м·°С); предел прочности при изгибе не менее 0,3 МПа.

Камышит – плитный материал, изготовленный из стеблей камыша путем прессования и скрепления стальной оцинкованной проволокой.

Различают: с поперечным и продольным расположением стеблей. Размеры, мм: 2400...2800 × 550..1500 × 30...100.

Средняя плотность 175 – 250 кг / м<sup>3</sup>; предел прочности при изгибе 0,5 МПа; теплопроводность 0,05 – 0,08 Вт/(м·°С).

Применение: заполнение каркасных наружных стен, внутренние перегородки малоэтажных жилых и сельскохозяйственных построек (влажность до 70 %).

Эковата – выпускают в виде мягких хлопьев, мягких хлопьев в мешках; матов; вязко – жидкого состава (жидкие обои).

Сырье – газетная макулатура (измельченная), химические порошки, клеящие вещества (КМЦ и другие), антипирены.

Средняя плотность 150 кг/м<sup>3</sup>. Теплопроводность 0,045 Вт/(м·°С).

Костроэмульбит – материал на основе костры льна и битумной эмульсии (теплоизоляция кровли, стеновых панелей).

Гранулированный утеплитель состоит из опилок, клея на основе карбоксиметилцеллюлозы, антипирена-антисептика. В сухом состоянии при средней плотности 180 кг/м<sup>3</sup> имеет коэффициент теплопроводности 0,076 Вт/(м·°С). Применяют в качестве утеплителя для деревянных панелей жилых малоэтажных зданий; в качестве насыпного и в качестве плитного утеплителя, как в малоэтажном деревянном домостроении, так и в разных отраслях строительной индустрии.

Теплоизоляционные материалы из древесины показаны на рисунках 6.7 и 6.8.





Рисунок 6.7 – Материалы из древесного сырья



Рисунок 6.8 – Материалы из древесного сырья

### 6.2.5 Теплоизоляционные материалы на основе полимеров

Полимерные теплоизоляционные материалы – двухфазная система, состоящая из полимерной матрицы и равномерно диспергированного газа.

Классификация:

- структура (ячеистые – пенопласты; пористые – поропласты; сотовые - со-топласты);
- вид полимера (термопластические, термореактивные);
- способ изготовления (беспрессовые и прессовые);
- модуль упругости (предел прочности при сжатии при 10 % деформации):
  - жесткие (более 0,15 МПа); полужесткие (0,15 – 0,01 МПа); эластичные (менее 0,01 МПа);
- функциональное назначение (плиты, фасонные изделия для кровли и стен, холодильной техники и другие).

Пористость: 90 – 95 %, в том числе 88 – 94 % – замкнутые (большинство материалов); диаметр 0,1 – 5 мм; толщина межпоровых перегородок 0,5 – 300 мкм; многомодальность.

Средняя плотность 10 – 250 кг / м<sup>3</sup> (зависит от вида полимера и количества порообразователя).

Теплопроводность 0,035 – 0,064 Вт/(м·0С).

Водопоглощение (зависит от вида и структуры материала) 2 – 4 % и 1200 %.

Температура применения: «–» 60... «+»200 0С. Горючесть.

Полимерные теплоизоляционные материалы получают беспрессовым и прессовым способами.

Беспрессовый способ получения поризованных полимеров – предусматривает тепловую обработку смеси в формах (без внешнего давления). Процесс сопровождается размягчением полимера, разложением газообразователя и вспениванием массы. Затем поризованный материал охлаждается.

Прессовый способ (с использованием давления извне, путем обжатия) – сырьевую смесь прессуют в формах при температуре 120 – 180 0С и давлении 12 – 20 МПа. Заготовка вспенивается вне формы при нагревании до 85 0С. Разновидностью прессового способа является экструзия.

Наиболее распространены пенополистирол, пенополивинилхлорид.

Пенополистирол. Мировая практика строительства в странах, владеющих новейшими технологиями, показывает, что самым эффективным теплоизоляционным материалом является пенополистирол, который производится беспрессовым способом или экструзией (рисунок 6.9).

Пенополистирол представляет собой теплоизоляционный материал, полу-чаемый вспениванием полистирола при температурной обработке. Вспененный полистирол имеет вид гранул размером 2 – 8 мм. Изготавливают из суспензионного вспенивающегося полистирола с добавлением антипирена. Формирование материала происходит методом удара паром при спекании гранул.

Пенополистирол используют для утепления подземных частей здания, фундаментов, стен подвалов, цокольных этажей, где применение других видов теплоизоляции недопустимо вследствие капиллярного поднятия грунтовых вод, и предохраняет гидроизоляцию от вредного воздействия окружающей среды. Влагостойкость, легкость и долговечность. Пенополистирольные плиты почти невесомы, удобны при транспортировке и монтаже, долговечны (таблица 6.7).

Таблица 6.7 – Характеристика пенополистирола

Наименование показателя, единица измерения	Норма показателя для плит ПСБ-С марок			
	М – 15	М – 25	М – 35	М – 50
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	до 15	от 15,1 до 25,0	от 25,1 до 35,0	от 35,1 до 50,0
Прочность при сжатии при 10 % деформации, МПа, не менее	0,05	0,1	0,16	0,20
Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	0,07	0,18	0,25	0,35
Теплопроводность, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С), не более	0,042	0,039	0,037	0,04
Водопоглощение за 24 ч, % по объему, не более	3,0	2,0	2,0	1,8

Присутствие влаги в материале обладает коварным свойством. Зимой вода в межгранульном пространстве, превращаясь в лед, постепенно разрушает пенопласт на отдельные гранулы, за счет чего долговечность плит из беспрессового пенополистирола существенно снижается.

Перечисленные недостатки практически несвойственны экструзионному пенополистиролу с гомогенной замкнутой структурой ячеек. Крайне низкое водопоглощение (менее 0,3 % по объему) и высокая механическая прочность делают этот материал уникальным и позволяют использовать его в качестве наружной изоляции зданий и сооружений различного назначения.

Экструзионный пенополистирол (ЭППС) становится незаменимым материалом для утепления подземных частей зданий, фундаментов, стен подвалов, цокольных этажей, а также в конструкции так называемой «инверсионной» (перевернутой) кровли. В последнем случае отсутствуют вредные воздействия на гидроизоляционную мембрану – важнейший элемент кровли, так как, утеплитель (пенополистирол) укладывается выше гидроизоляционной системы защищая ее от воздействия ультрафиолетового излучения, резких перепадов температуры, механических повреждений, позволяя проводить монтаж кровли в любое время года. Кроме того, конструкция кровли позволяет отказаться от отдельного пароизоляционного слоя и увеличивает срок службы гидроизоляционной мембраны.

Уникальные свойства экструзионного пенополистирола позволяют проводить утепление оснований автомобильных и железных дорог, аэродромов. Применение утепления в данном случае позволяет уменьшить глубину промерзания грунта и, следовательно, устранить пучение грунта при оттаивании.

Применение экструзионного пенополистирола в качестве утеплителя снаружи зданий позволяет существенно повысить теплоизоляционные характеристики стен не уменьшая полезной площади внутри зданий. Это практически единственный вид утеплителя, позволяющий решить задачи утепления подземной части зданий в условиях разрушающего воздействия грунтовых вод и подвижек.



Пеноплекс – экструдированный пенополистирол, принадлежит к новой формации эффективных теплоизоляционных полимеров (рисунок 6.10).



Рисунок 6.9 – Пенополистирол

Физико-механические свойства	Тип 31С	Тип 31	Тип 35	Тип 45С	Тип 45
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	28,0-30,5	28,0-30,5	28,0-38,0	35,0-40,0	38,1-45,0
Прочность на сжатие при 2 %-ной линейной деформации, кПа	66	66	83	136	167
Модуль упругости, кПа	14000	14000	15000	17000	18000
Предел прочности при статическом изгибе, кПа	250-700	250-700	400-700	350-700	350-700
Водопоглощение за 30 сут., не более, % по объему	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Категория стойкости к огню	Г4	Г1	Г1	Г4	Г4
Теплопроводность при условии эксплуатации «А», Вт/(м·°С)	0,031	0,031	0,31	0,031	0,031
То же, «Б», Вт/(м·°С)	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С)	1,65	1,65	1,65	1,53	1,53
Козффициент паропроницаемости мг/(м·ч·Па)	0,018	0,018	0,018	0,015	0,015
Температурный диапазон эксплуатации, °С	От -50 до +75				
Долговечность, лет	Более 50				
Размеры плит, мм					
длина	1200			2400	
ширина	600				
толщина	30; 40; 50; 60; 80; 100; 120				

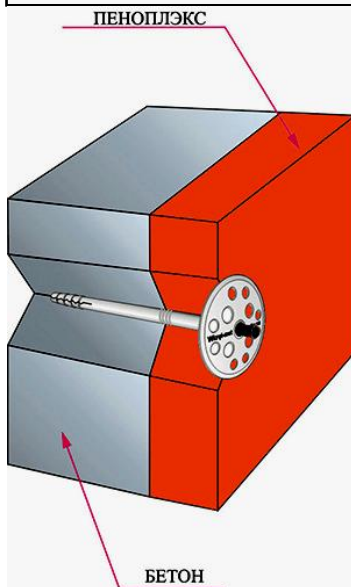
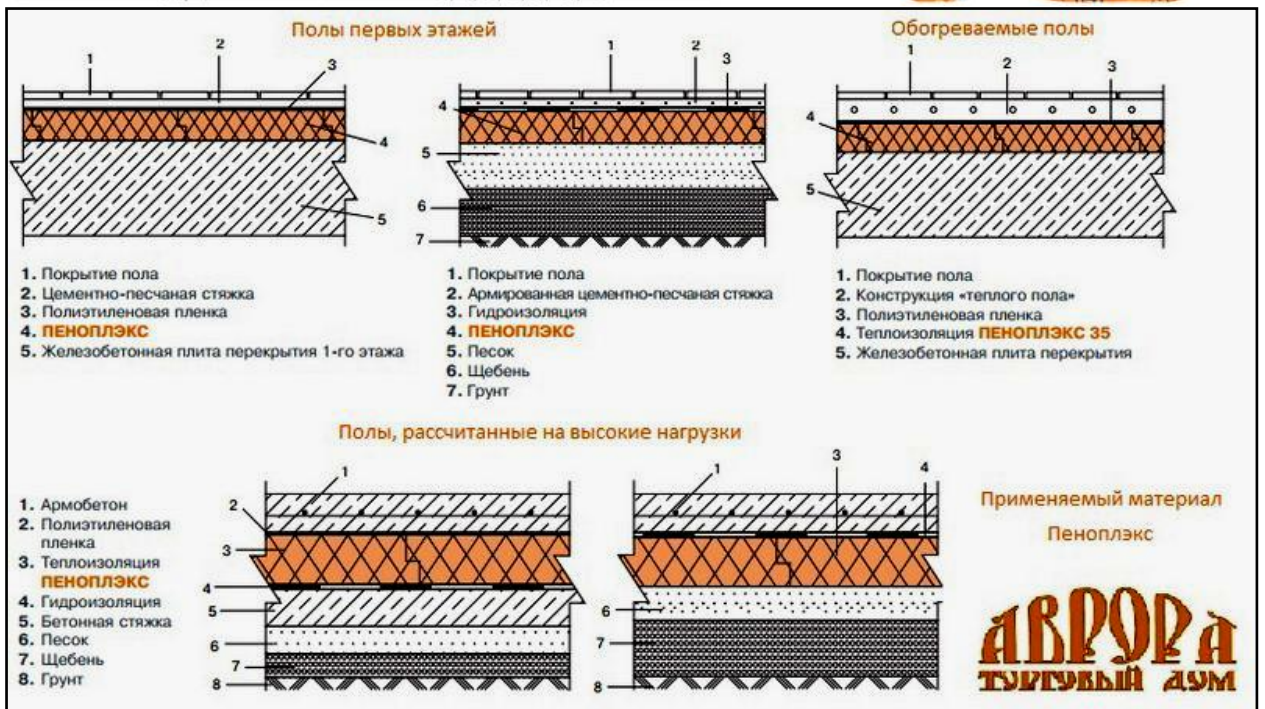


Рисунок 6.10 – Пеноплэкс

## 6.2.6 Полистиролбетон

Полистиролбетон – композиционный материал, разновидность легких ячеистых бетонов. Состав формовочной смеси для получения полистиролбетона включает портландцемент и его разновидности, пористый наполнитель модифицирующие добавки (ускорители схватывания, пластификаторы, воздухововлекающие и другие), воду, также возможно введение кремнеземистого наполнителя (кварцевый песок или зола-унос ТЭС). В качестве пористого наполнителя используют гранулы вспененного полистирола (рисунок 6.11).

Управляя соотношением компонентов бетонной смеси, можно получать различные марки конструкционного и теплоизоляционного полистиролбетона. Выраженные теплофизические свойства полистиролбетона позволяют использовать этот материал как самостоятельную систему утепления наружных стен вместо применения систем скрепленной теплоизоляции, в которых в качестве утеплителя используют минеральную вату или пенополистирол.

Пенополистирольный наполнитель гораздо легче традиционных наполнителей (керамзита, перлита, вермикулита), обладает меньшими значениями водопоглощения и теплопроводности.

Цементный камень защищает полистирольные гранулы от огня и атмосферных воздействий. Пенополистирол придает бетону легкость и теплоизолирующие свойства.

Классы и марки полистиролбетона в конкретных изделиях назначают по нормативам на эти изделия, по нормам строительного проектирования с учетом требований таблицы 6.8

В зависимости от назначения и условий работы полистиролбетон в изделиях и конструкциях в соответствии может иметь плотную, поризованную или крупнопористую структуру.

Полистиролбетон плотной или поризованной структуры с расходом цемента не менее  $200 \text{ кг/м}^3$  обеспечивает при обычных условиях эксплуатации сохранность стальной арматуры от коррозии.



Таблица 6.8 – Основные технические характеристики полистиролбетона

Марка по средней плотности, кг/м <sup>3</sup>	Марка или класс по прочности на сжатие	Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/(м·°С)	Марка по морозостойкости
D150	M 2,5	0,10	0,055	F25
D200	M 3,5	0,15	0,065	F25 – F35
D250	B 0,35	0,25	0,075	F35 – F50
D300	B 0,5	0,35	0,085	F35 – F50
D350	B 0,75	0,50	0,095	F50 – F75
D400	B 1,0	0,60	0,105	F50 – F75
D450	B 1,5	0,65	0,115	F50 – F75
D500	B 2,0	0,70	0,125	F50 – F100
D550	B 2,5	0,73	0,135	F50 – F100
D600	B 2,5	0,73	0,145	F50 – F100

Марку по удобоукладываемости (жесткость или подвижность) полистирол-бетонных смесей плотной или поризованной структуры назначают в пределах Ж1 – Ж3 и П1 – П5 в зависимости от вида и технологии формования изделий.

Объем межзерновых пустот в уплотненных полистиролбетонных смесях плотной и поризованной структуры не должен превышать 3 %.

Объем вовлеченного воздуха в полистиролбетонной смеси не нормируется.

Приготовленная полистиролбетонная смесь не должна расслаиваться в процессе ее выгрузки, транспортирования и формования.

В качестве заполнителя для полистиролбетона следует применять полистирол вспененный гранулированный (ПВГ) – продукт одно – или многоступенчатого вспенивания суспензионного вспенивающегося полистирола.

Допускается при изготовлении полистиролбетонов класса по прочности B1,0 и менее при условии соблюдения требований по экологической и противопожарной безопасности применение пенополистирольного заполнителя, получаемого дроблением отходов пенополистирольных плит.

В зависимости от качества сырья и режима вспенивания пенополистирольный заполнитель может иметь марку по насыпной плотности 10, 15, 20, 25, 30.

По размерам зерен ПВГ подразделяют на крупный и мелкий. Фракционный состав крупного и мелкого ПВГ должен соответствовать требованиям, указанным в таблице 6.9. Наличие в ПВГ зерен крупностью

более 20 мм не допускается. Влажность ПВГ не должна превышать 15 % по массе.

Таблица 6.9 – Фракционный состав полистирольного вспененного заполнителя

Размер фракции, мм	Содержание, % , по объему в ПВГ	
	крупный	мелкий
10 – 20	5 – 20	0 – 5
5 – 10	70 – 30	30 – 50
2,5 – 5	20 – 50	40 – 60
0 – 2,5	0 – 5	5 – 10

Область применения полистиролбетона для объектов жилищного и промышленного строительства чрезвычайно широка (таблица 6.10).

Таблица 6.10 – Рекомендуемые области применения полистиролбетона

Область применения	Показатели по	
	средней плотности	прочности при сжатии
Теплоизоляционные плиты	D150 – D250	M2 – M3,5
Монолитная теплоизоляция кровель	D150 – D250	M2 – M3,5
Монолитная теплоизоляция трехслойных панелей, блоков и наружных стен	D200 – D250	M2,5 – M3,5
Теплоизоляция в колодцевой кладке	D150 – D250	M2,5 – M3,5
Пустотелые элементы для сборно-монолитных стен	D250 – D350	B0,5 – B1,0
Сплошные блоки или монолитные стены:		
– ненесущие	D250 – D400	B0,5 – B1,0
– самонесущие	D350 – D450	B1,0 – B1,5
– несущие	D450 – D600	B1,5 – B2,5

Полистиролбетон считают альтернативой ячеистым бетонам из-за простоты изготовления, превосходства теплотехнических показателей, более широкой области применения. Полистиролбетон обладает долговечностью, высокой тепло– и звукоизоляцией, высокой прочностью; экологически безопасен, морозостоек, паропроницаем, имеет низкую сорбционную влажность. В сравнении с другими стеновыми материалами полистиролбетон имеет самый низкий коэффициент теплопроводности.

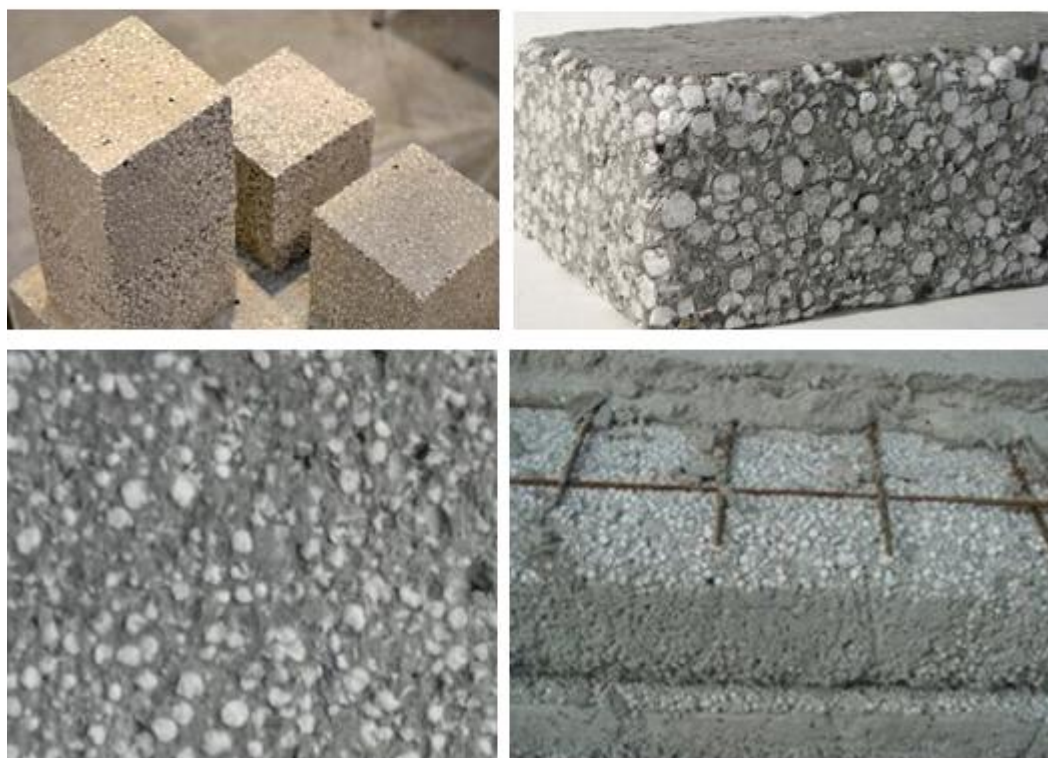


Рисунок 6.11 – Полистиробетон

### 6.2.7 Жидкая теплоизоляция

Жидкая теплоизоляция – однородная жидкая суспензия (мастика) на основе полимерной дисперсии, специальных легковесных наполнителей и модифицирующих компонентов. Например, композиция на основе акриловых полимеров, полых стеклокерамических микросфер, пигментов и вспомогательных веществ.

Жидкая теплоизоляция наносят на изолируемые поверхности кистью или распылителем. После высыхания жидкой теплоизоляции образуется прочное эластичное покрытие с упорядоченной микропористой структурой, обладающее теплозащитными и антикоррозионными свойствами (таблица

6.11). Энергосберегающее покрытие используют для теплоизоляции фасадов и стен (рисунок 6.12).

Жидкий утеплитель способствует поддержанию комфортной температуры в помещении за счет высоконаполненной микропористой структуры материала, которая отражает, рассеивает и сдерживает тепловой поток. Высокие теплофизические и эксплуатационные характеристики покрытия позволяют эффективно сократить расход энергии на отопление здания (энергосберегающая краска).

Пластичная и густая консистенция жидкого керамического материала позволяет наносить теплоизоляцию как мастику и проводить обработку поверхностей любой формы, там, где традиционные теплоизоляционные материалы трудно применимы. Теплоизоляционное покрытие можно перекрасить фасадной краской, в цвет, соответствующий принятому архитектурному решению.

Жидкая теплоизоляция не создает дополнительной весовой нагрузки на несущие строительные конструкции. Покрытие устойчиво к атмосферным воздействиям, перепадам температур, ультрафиолетовому излучению, не подвержено старению, образованию трещин и разрушению. Эффективно устраняет «мостики холода», рассеивает лучистую энергию. Препятствует промерзанию стен, образованию конденсата и плесени.

Таблица 6.11– Свойства жидкой теплоизоляции

Наименование показателя	Норма
Внешний вид покрытия	паста однородной консистенции
Расход, г/м <sup>2</sup> при толщине слоя 1 мм	630
Массовая доля нелетучих веществ, %	55
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,6 – 0,9
Время высыхания при +20С±20С, мин, не более	60
Время полной полимеризации, сут, не более	7
Область рабочих температур, °С	от минус 60 до плюс 150
Адгезия, не менее, МПа	
– к стали Ст3ПС	0,37
– к бетонной поверхности	1,5
– к кирпичной поверхности	1,3
Теплопроводность, Вт/(м °С)	0,06 – 0,05. зависит от количества слоев
Тепловосприятие, Вт/(м °С)	1,6 – 3,0. зависит от количества слоев
Теплоотдача, Вт/(м °С)	2,0 – 5,0
Эластичность пленки при изгибе, мм	1
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м*ч*Па), не менее	0,019
Смываемость пленки, г/м <sup>2</sup>	0,8
Водопоглощение, % 24 ч, не более	2
Температура поверхности при покрытии, °С	от плюс 7 до плюс 95





	традиционная теплоизоляция	КОРУНА
ТОЛЩИНА, мм	50	1
ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, Вт/м °С	0,034 - 0,052	0,001
ТРУДОЗАТРАТЫ, чел.час/м <sup>2</sup>	10	1 - 2
СРОК СЛУЖБЫ	до 5 лет	от 10 лет
РЕМОНТ	трудно выполним	легко выполним



### СТРУКТУРА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ «ТЕПЛОМЕТТ»

- — ВАКУУМНЫЙ СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИЙ ШАРИК ДИАМЕТРОМ 0,05-0,1 мм
- — ВАКУУМНЫЙ АЛЮМОСИЛИКАТНЫЙ ШАРИК ДИАМЕТРОМ 0,02-0,05 мм
- — МИКРОПРИСТАЯ ЧАСТИЦА ДИОКСИДА ТИТАНА
- ✦ — ЛАТЕКСНАЯ СМЕСЬ С АКРИЛОВЫМИ МИКРОСФЕРАМИ (AKZO NOBEL)



- Вакуумный керамический шарик диаметром 0,01 мм
- Вакуумный силиконовый шарик диаметром 0,02 мм
- Латексная смесь с акриловыми переплетениями

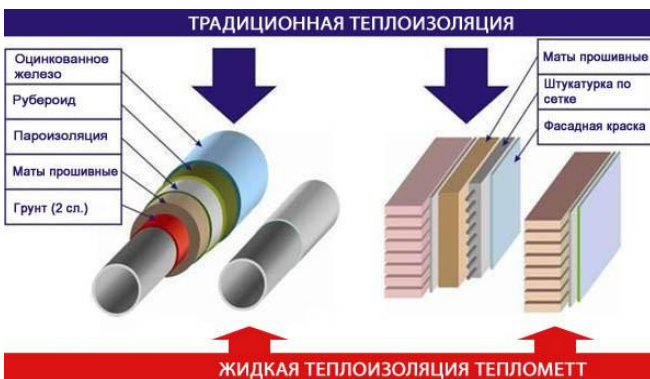


Рисунок 6.12 – Жидкая теплоизоляция

### 6.3 Контрольные вопросы

1. Теплоизоляционные материалы: понятие, назначение, классификация.
2. Теплоизоляционные материалы: структура, свойства, марки.
3. Минеральная вата: характеристика, свойства, изделия на ее основе, назначение, преимущества и недостатки.
4. Пеностекло: характеристика, разновидности, назначение.
5. Ячеистые бетоны: разновидности, свойства, виды изделий.
6. Теплоизоляционные материалы из древесины: характеристика отдельных видов, назначение, преимущества и недостатки.
7. Полимерные теплоизоляционные материалы: общая характеристика, разновидности, преимущества и недостатки.
8. Пеноплекс: характеристика, назначение.
9. Полистиролбетон: состав формовочной массы, свойства, назначение.
10. Жидкая теплоизоляция: характеристика, назначение, преимущества.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Сулименко, Л.М. Технология минеральных вяжущих материалов и изделий на их основе / Л.М. Сулименко. – М.: Высш. шк., 2005. – 303 с.
- 2 Дворкин, Л.И. Строительные минеральные вяжущие материалы /Л.И. Дворкин, О.Л.Дворкин. – М.: Инфра-Инженерия, 2011. – 544 с.
- 3 Гипсовые материалы и изделия (производство и применение): Справочник / Под ред. А.В. Ферронской. – М.: АСВ, 2004. – 488 с.
- 4 Классен, В.К. Технология и оптимизация производства цемента краткий курс лекций: учеб. пособие / В.К. Классен. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г.Шухова, 2012. – 308 с.
- 5 Сулименко, Л.М. Общая технология силикатов: учебник/Л.М. Сулименко. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 336 с.
- 6 Таймасов, Б.Т. Технология производства портландцемента: учеб. пособие / Б.Т.Таймасов. – Шымкент: Изд-во ЮКГУ, 2004. – 293 с.
- 7 Мирюк, О.А. Минеральное сырье для вяжущих и композиционных материалов: учеб. пособие / О.А. Мирюк.. – Рудный: РИИ, 2004. – 124 с.
- 8 Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 528 с.
- 9 Несветаев, Г.В. Бетоны: учеб. пособие/Г.В. Несветаев. – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – 384 с.
- 10 Дворкин, Л.И. Специальные бетоны: учеб. пособие /Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – М.: Инфра-Инженерия, 2012. – 368 с.
- 11 Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 368 с.
- 12 Касторных, Л.И. Добавки в бетоны и строительные растворы: учебное пособие / Л.И. Касторных. – Ростов н /Д. : Феникс, 2005. – 221 с.
- 13 Бобров, Ю.Л. Теплоизоляционные материалы и конструкции / Ю.Л. Бобров и [др.] – М.: ИНФРА – М, 2014. – 272 с.
- 14 Технология изоляционных строительных материалов и изделий. В 2 ч. Ч. 1. Стеновые материалы и изделия: учеб. пособие/ В.Ф. Завадский. – М.: Академия, 2012. – 192 с.
- 15 Технология изоляционных строительных материалов и изделий. В 2 ч. Ч. 2. Тепло- и гидроизоляционные материалы и изделия: учеб. пособие / О.А. Игнатова. – М.: Академия, 2012. – 288 с.
- 16 Киреева, Ю.И. Современные строительные материалы и изделия / Ю.И. Киреева. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 256 с.
- 17 Ни, В.В. Строительные материалы: учебник/В.В. Ни. – Астана: Фолиант, 2013. – 304 с.
- 18 Шахова, Л.Д. Технология пенобетона. Теория и практика: монография/Л.Д. Шахова. – М.: АСВ, 2010. – 248 с.
- 19 Роговой, М.И. Технология искусственных пористых заполнителей и керамики / М.И. Роговой. – М.: Стройиздат, 2011. – 320 с.



- 20 Еспаева, А.С. Технология плитных материалов: учебник /А.С. Еспаева. – Алматы: Дәуір, 2011. – 488 с.
- 21 Основин, В.Н. Справочник по строительным материалам и изделиям / В.Н. Основин. – Ростов н / Д: Феникс, 2006. – 443 с.
- 22 Попов, К.Н. Строительные материалы и изделия: учебник/ К.Н. Попов, М.Б. Каддо. – М.: Высш.шк., 2008. – 440 с.
- 23 Мирюк, О. А. Формирование структуры ячеистых бетонов: учеб. пособие / О.А. Мирюк. – Рудный: РИЦ РИИ, 2015. – 210 с.
- 24 Мирюк, О.А. Технологические аспекты долговечности бетона: учеб. пособие / О.А. Мирюк. – Рудный: РИИ, 2009. – 236 с.
- 25 Мирюк , О.А. Ресурсосбережение в технологии строительных материалов: учеб. пособие // О.А. Мирюк. – Рудный: РИИ, 2011. – 258 с.
- 26 Миронова, Д.В. Керамический гранит в технологиях фасадов / Д.В. Миронова // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI в. – 2007. – № 6. – С. 40 – 41.
- 27 Салахов, А.М. Современные керамические материалы: учеб. пособие / А.М. Салахов. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2016. – 407 с.
- 28 Станевич, В.Т. Строительная керамика: учебное пособие / В.Т. Станевич. – Павлодар: Кереку, 2008. – 96 с.
- 29 Мороз, И.И. Технология строительной керамики. – Киев: Вища школа. 1990. – 415 с.
- 30 Микульский, В.Г. Строительные материалы (материаловедение и технология): учебник / В.Г. Микульский, В.В. Козлов, М: ИАСВ, 2004. - 530 с.
- 31 Рыбьев И.А. Строительное материаловедение: учеб. пособие. – 2-е издание, испр. / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 2004. – 701 с.
- 32 Рыбьев И.А. Материаловедение в строительстве/ И.А. Рыбьев и др. – М.: «Академия», 2008. – 528 с.
- 33 Сухие строительные смеси КНАУФ: информационное издание. январь, 2011.