

Б91

Г52

К. В. Гладких

# ИЗДЕЛИЯ ИЗ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ШЛАКОВ И ЗОЛ



Б66

Г52

К. В. Гладких

ИЗДЕЛИЯ  
ИЗ ЯЧЕЙСТЫХ  
БЕТОНОВ  
НА ОСНОВЕ  
ШЛАКОВ И ЗОЛ



МОСКВА  
СТРОПИЗДАТ  
1976

Гладких К. В. Изделия из ячеистых бетонов на основе шлаков и зол. М., Стройиздат, 1976. 256 с.

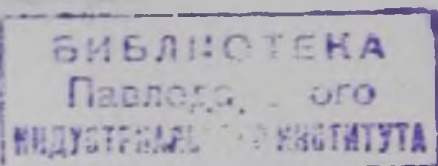
Изложены результаты исследований шлакозольных ячеистых бетонов и изделий, а также опыт производства и применения их в строительстве. Описаны химико-минералогические свойства использованных шлаков и зол в ячеистых бетонах в качестве вяжущих веществ и заполнителей, вопросы образования пористой структуры в шлакозольном плотном камне и влияния ее на строительно-деформативные свойства ячеистобетонных изделий. Рассмотрены технологические приемы по снижению конечной влажности, усадочных деформаций, трещинообразований бетонов неавтоклавно и автоклавного твердения. Даны технико-экономические показатели эффективности комплексного использования шлаков и зол в производстве изделий из ячеистых бетонов и их применения в строительстве.

Книга предназначена для научных работников научно-исследовательских организаций и инженерно-технических работников промышленности строительных материалов.

Табл. 52, рис. 58, список лит.: 86 назв.

326118

Г 30209—444  
047(01)—76 253—75



© Стройиздат, 1976

Клара Васильевна Гладких

## ИЗДЕЛИЯ ИЗ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ШЛАКОВ И ЗОЛ

Редакция литературы по строительным материалам и конструкциям

Зав. редакцией И. А. Рабинович

Редактор Н. М. Николаева

Мл. редактор И. Б. Бульдьева

Внешнее оформление художника И. И. Комарова

Технический редактор Г. В. Климушкина

Корректоры В. А. Быкова, Г. Г. Морозовская

Сдано в набор 3/IX—1975 г. Подписано к печати 2/III—1976 г. Т-05722.  
Формат 84×108/32 д. л. 13,44 усл. печ. л. (уч.-изд. 14,31 л.). Тираж 5.000 экз.  
Изд. № АVI—4333. Зак. № 288. Цена 1 р. 11 к.

Стройиздат

103006, Москва, Каляевская, д. 23а

Владимирская типография Союзполиграфпрома

при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли

Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

## ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие в СССР и за рубежом производство облегченных, эффективных изделий и конструкций из поризованных бетонов развивается особенно интенсивно.

Советские ученые внесли большой вклад в развитие отечественной и зарубежной практики производства изделий из автоклавных и неавтоклавных ячеистых бетонов. В настоящее время уже действует более 100 заводов по производству ячеистобетонных изделий.

Быстрый темп роста производства ячеистобетонных изделий за последние годы обусловлен использованием недефицитного природного сырья и отходов производства, надежностью и относительной простотой технологии, позволяющей на одном предприятии из одного и того же сырья за счет изменения степени поризации бетона получать ячеистый бетон для тепло- и звукоизоляции, стеновые конструктивно-теплоизоляционные и конструктивные изделия с объемной массой от 300 до 1200 кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии от 1 до 20 МПа, высокого качества и низкой стоимости.

Внедрение на заводах новой вибрационной, резательной, кассетной технологии, разработанной советскими специалистами, позволило значительно расширить ассортимент ячеистобетонной продукции с переходом на выпуск стеновых панелей на одну и две комнаты, крупных и мелких блоков, плит совмещенной кровли, стеновых панелей для промышленных и гражданских зданий. Стеновые панели из ячеистого бетона выпускаются с отделкой керамической и стеклянной плиткой, дроблеными каменными материалами и др. Несмотря на достигнутые успехи в области производства и применения изделий и конструкций из ячеистого бетона, дальнейшее совершенствование в этой области строительной промышленности сдерживается существующей технологией, включающей

обязательную тепловлажностную обработку изделий паром высокого давления в металлоемком тепловом агрегате — автоклаве.

Вместе с тем в результате быстрого развития металлургии, химической промышленности, энергетики во многих районах страны вблизи мощных металлургических и химических комбинатов, а также тепловых электростанций накопились десятки миллионов тонн шлаков и зол, которые, претерпев высокотемпературные воздействия, приобрели ценные гидравлические или пуццоланнические свойства, предопределяющие возможность использования их в производстве различных шлакозольных вяжущих, твердеющих не только в автоклавах при повышенном давлении, но и в обычных пропарочных камерах, при контактном электропрогреве и при прогреве инфракрасными лучами.

Многолетними работами коллектива кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов МИСИ им. В. В. Куйбышева, проводившимися под руководством проф., д-ра техн. наук А. В. Волженского, установлено, что применение тепловой обработки не только значительно ускоряет процессы твердения шлаковых вяжущих из доменных гранулированных шлаков, но и дает возможность использовать в качестве сырья инертные или малоактивные кислые и сверхкислые, низкоглиноземистые и высококремнеземистые гранулированные, а также отвальные шлаки и золы.

Исследованиями МИСИ им. В. В. Куйбышева и других организаций доказана возможность получения шлакозольных вяжущих с маркой после пропаривания 150—300 и после запаривания 200—500.

Важно также отметить новое в изготовлении шлакопортландцемента из кислых топливных гранулированных шлаков, а также шлаков электротермической возгонки фосфора и шлаков цветной металлургии, обычно получаемых в гранулированном виде.

Замена известково-песчаного, известково-цементного вяжущего в производстве ячеистобетонных изделий шлаковыми и зольными вяжущими, а также тонкодисперсного кварцевого песка — молотыми гранулированными шлаками или пылевидными золами, обладающими повышенной активностью, позволит улучшить качество изделий при автоклавном твердении и перейти на широкое внедрение неавтоклавных шлакозольных изделий.

Технико-экономическая эффективность производства шлакозольных изделий из ячеистых бетонов обусловлена использованием местного дешевого сырья с благоприятным химическим и минералогическим составом, позволяющим получать изделия такой низкой стоимости, какая не может быть достигнута при производстве последних из традиционных материалов, к тому же часто дальнепривозных. Твердение изделий из шлаков и зол может осуществляться в пропарочных камерах или с помощью электрического тока, что не требует дорогостоящего оборудования, значительно упрощает технологию и позволяет выпускать ячеистобетонные изделия, экономически выгодные в районах концентрации сырья. Опыт заводского производства и применения в строительстве шлакозольных ячеистобетонных стеновых панелей для жилищного, промышленного и сельского строительства неавтоклавного и автоклавного твердения в гг. Донецке, Днепрпетровске, Новокузнецке, Ангарске, Нижнем Тагиле, Ворошиловграде и других свидетельствует о надлежащей трещиностойкости и долговечности изделий при эксплуатации их в соответствии с требованиями СНиП.

Ежегодный выход шлаков и зол металлургической, химической и энергетической промышленности составляет более 180 млн. т. Широкая переработка этого ценного сырья в строительные материалы и изделия снизит стоимость последних на 20—30%, что даст стране ощутимый экономический эффект.

Автор выражает свою искреннюю благодарность лауреату Ленинской премии, д-ру техн. наук, проф. А. В. Волженскому и доценту, канд. техн. наук Б. Н. Виноградову за помощь и ценные советы, а также канд. техн. наук А. Т. Баранову за замечания, сделанные при рецензировании рукописи.

Пожелания читателей автором будут приняты с признательностью.

### 1. ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ШЛАКОВ И ЗОЛ И ИХ ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Среди промышленных отходов шлаки и золы занимают одно из первых мест. Ежегодно выход их составляет около 180—200 млн. т. В зависимости от вида производства и физико-химического взаимодействия компонентов исходных твердых материалов — топлива, руды, плавней — в условиях высоких температур (более 1300—1500° С) образуются шлаки в металлургических печах при получении чугуна, стали, никеля, олова и других металлов, а также шлаки и золы при сжигании угля, сланцев, торфа на тепловых электростанциях.

Минералогический состав неорганической части исходных материалов в металлургической, энергетической, химической промышленности представлен обычно кварцем, глинистыми минералами, слюдами, полевыми шпатами, окислами и гидроокислами железа, карбонатами кальция и магния, гипсом, сульфидами, фосфатом кальция и др.

В процессе термического воздействия указанные минералы изменяются, взаимодействуют друг с другом и образуют различные соединения, которые в зависимости от температуры и состава сырьевых материалов обуславливают образование шлаков и зол переменного химического и минералогического состава.

Можно отметить общее в процессах образования шлаков и зол:

- 1) полное расплавление исходных компонентов, предопределяющее эффективность жидкого шлакоудаления. Этот способ удаления пустых пород является преобладающим в металлургической, химической промышленности и в меньшей степени на крупных новых тепловых установках энергетической промышленности (рис. 1). Шлаковые расплавы при быстром охлаждении водой, сжатым воздухом или паром переходят в стекловидное состояние с образованием отдельных гранул размером менее 10—15 мм;

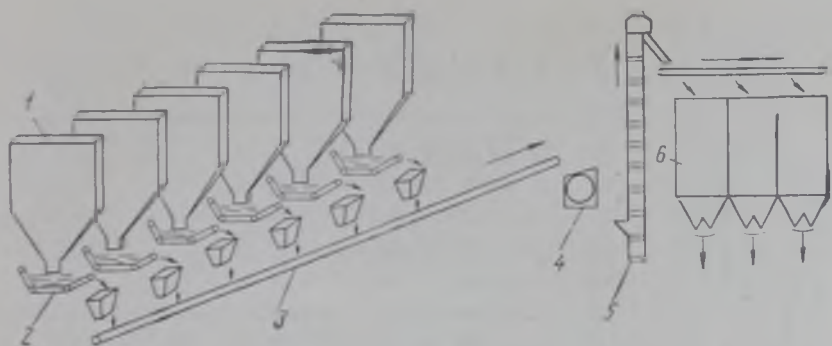


РИС. 1. СХЕМА ОБРАЗОВАНИЯ И УДАЛЕНИЯ ТОПЛИВНОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ШЛАКА НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ПРИ ЖИДКОМ ШЛАКОУДАЛЕНИИ

1 — котлоагрегаты; 2 — цепной транспортер; 3 — ленточный транспортер; 4 — дробилка; 5 — ковшовый элеватор; 6 — бункера с топливным гранулированным шлаком

2) образование побочных продуктов без появления расплава в результате реакций дегидратации, окисления, восстановления, диссоциации, полиморфных превращений и др. в твердой фазе и в присутствии расплава — при взаимодействии расплава с твердыми фазами. В этом случае отходы удаляют в твердом состоянии в виде кускового шлака или пылевидной золы, что характерно для энергетической промышленности при сжигании твердого топлива в тепловых установках [54].

Однако далеко не все виды шлаков и зол используют в производстве строительных материалов и изделий. Это объясняется недостаточной изученностью разновидностей шлакозольных материалов и невыявленностью рациональных областей их применения.

При определении области применения шлаков и зол необходимо знать свойства исходных расплавов, их химический и минералогический состав, а также физические свойства, гидравлическую и пуццоланическую активность шлаков и зол, охлажденных при разных режимах. В побочных продуктах — шлакозольных материалах — содержание окислов и температура их образования строго регламентированы технологией производства основного продукта — металла, фосфора, электроэнергии и т. д. Это технологическое постоянство определяет получение доменных, мартеновских, ваграночных шлаков, шлаков цветной металлургии, электрофосфорного произ-

*Bus Gas?*



Таблица 1. Химический состав важнейших видов шлаков и зол (% по массе), использованных для изготовления вяжущих веществ и тонкодисперсных заполнителей для ячеистых бетонов

Заводы и ТЭЦ	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + +TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	MnO	SO <sub>2</sub>	S	Модуль основ- ности	Модуль актив- ности	Содер- жание стекла
Доменный шлак гранулированный												
Ждановский метал- лургический	38,11	6,07	—	0,92	47,85	2,79	2,41	1,7	—	1,15	0,16	88
Новотульский	36,49	8,42	0,19	0,63	49,32	1,3	2,28	2,06	—	1,13	0,23	84
Чусовской	33,54	17,89	Нет	0,7	34,16	8,94	1,89	1,36	Нет	0,84	0,53	98
Челябинский	37,87	11,02	0,35	0,51	39,89	5,88	1,75	1,01	0,39	0,93	0,29	88
Магнитогорский	37,65	14,16	—	0,98	39,5	6,85	0,85	Нет	0,64	0,89	0,38	92
Новокузнецкий	36,47	12,57	Нет	3,73	39,01	4,87	2,74	0,76	0,45	0,89	0,34	70
Шлаки цветной металлургии — гранулированные												
Южуралникель	43,12	9,09	1,16	14,58	23,34	8,1	0,58	0,43	0,24	0,6	0,2	99
Карабашский медепла- вильный	35,26	6,28	Нет	47,7	6,59	0,89	Не опре- деля- лось	2,42	0,61	0,18	0,16	98
Мартеновский шлак — отвальный												
«Серп и молот»	22,74	1,48	2,95	12,36	39,07	12,28	8,52	0,62	0,23	2,12	0,06	Нет
«Станколит»	39,45	10,71	1,05	6,3	35,12	1,6	4,51	0,67	—	0,73	0,27	8

Ваграночный шлак—отвальный

Завод им. Войкова	48,56	14,94	1,26	19,39	8,98	0,69	6,42	0,26	—	0,15	0,3	
-------------------	-------	-------	------	-------	------	------	------	------	---	------	-----	--

Шлак электротермического производства фосфора—гранулированный

Пермский	42,04	4,15	—	0,35	42,81	4,08	0,44	—	0,31	1,02	0,1	89
----------	-------	------	---	------	-------	------	------	---	------	------	-----	----

Энергетические пылевидные золы

Назаровская ГРЭС	41,16	9,47	13,55	—	30,07	6,5	—	0,8	—	0,7	0,22	75
Красноярская ТЭЦ-1	39,6	10,5	15,1	—	28,3	6,1	—	0,3	—	0,7	0,21	82
Иркутская ТЭЦ-1	64,06	19,75	3,02	—	5,4	2,4	—	0,4	—	0,01	0,34	80
Московская ТЭЦ-11	47,36	23,52	18,12	—	4,45	1,75	—	0,34	—	0,08	0,2	70
Кураховская ТЭЦ	45,24	25,7	15,65	—	3,95	1,51	—	0,38	—	0,08	0,8	78
Ступинская ТЭЦ	41,72	33,47	15,1	—	4,96	1,46	—	1,34	—	0,08	0,8	82
Дорогобужская ТЭЦ	42,5	29,3	17,5	—	3,8	1,5	—	1	—	0,06	0,75	80

Сульфатсодержащие золы подмосковных углей

Опытное производство	34,2	34,51	3—4	19,41	1,06	—	7,81	0,14	0,26	—		70
----------------------	------	-------	-----	-------	------	---	------	------	------	---	--	----

Энергетические гранулированные шлаки

Московская ТЭЦ-11	47,36	23,52	Нет	18,12	4,45	1,75	—	0,34	—	0,08	0,51	92
Московская ТЭЦ-22	48,32	28,06	1,16	14,42	4,19	1,11	—	0,49	—	0,06	0,58	85
Мионовская ГРЭС	48,81	27,31	18,56	0,35	3,01	1,15	—	0,21	—	0,05	0,59	89
Ленинградская ТЭЦ-14	60,4	22,88	Нет	8,96	4,08	2,82	—	0,87	—	0,08	0,4	85
Назаровская ГРЭС	46	8,57	11,25	2,02	26,5	3,4	—	0,2	—	0,55	0,18	79

водства, шлаков и зол электростанций, сжигающих угли определенных бассейнов, позволяет оценивать их качество в зависимости от свойств сырья и целенаправленно использовать их в строительной промышленности. В МИСИ имени В. В. Куйбышева было изучено более 60 видов шлаков и зол с целью использования их в производстве вяжущих веществ и бетонов [22]. В табл. 1 приводится химический состав важнейших разновидностей гранулированных шлаков и пылевидных зол. По содержанию окислов, значениям модулей основности и активности можно выделить основные группы промышленных отходов.

Направленность работы потребовала выявления шлакозольных материалов с высокой активностью, обеспечивающих создание пористой структуры в ячеистых бетонах повышенной прочности. Такими материалами являются быстроохлажденные шлаковые расплавы, состоящие в основном из стекловидной фазы, обладающей повышенной реакционной способностью в щелочной и сульфатной средах.

Установлено, что чем выше температура расплава, тем проще строение комплексных анионов и ионных группировок, состоящих из катионов кальция, магния, железа, натрия и др. и анионов кислорода и кремния, алюминия, хрома, фосфора и т. п. [50]. При медленном охлаждении шлакового расплава усложняется строение этих группировок с выделением комплексных анионов с замкнутыми группами  $\text{Si}_3\text{O}_9^{6-}$  или  $\text{Si}_6\text{O}_{18}^{12-}$  бесконечными кремнекислородными цепочками  $(\text{Si}_2\text{O}_5)_n$  и бесконечной «вязью» из кремнекислородных групп  $(\text{SiO}_2)_n$ .

В дальнейшем эти группировки служат основой формирования кристаллической решетки шлаковых минералов.

В зависимости от химического состава шлаковых расплавов отвалы медленно охлажденные шлаки состоят из кристаллических фаз — силикатов кальция в виде ортосиликата кальция, ранкинита, псевдоволластонита, геленита и алюмосиликатов кальция. В присутствии серы и железа возникает ольдгамит, сульфиды железа, а также пироксены, фаялит, вюстит, мелилит и т. п.

Перечисленные шлаковые минералы, кроме ольдгамита, состоящие из плотных кристаллов, не гидратируются при обычной температуре 18—20° С. С целью ускорения процесса гидратации закристаллизованных шла-

ков с содержанием  $\text{CaO} > 45\%$  необходимо повышение температуры до  $175^\circ\text{C}$ , т. е. запаривание их в автоклаве. В случае же использования шлаков с содержанием  $\text{CaO}$  менее  $45\%$  необходима высокая температура и щелочно-сульфатная активизация.

Эти условия сдерживают широкое применение отвальных шлаков в производстве вяжущих веществ и бетонов, так как требуется специальное оборудование (автоклавы) и насыщенный пар высокого давления.

Кроме того, закристаллизованные шлаки обладают повышенной твердостью, что приводит к увеличению расхода электроэнергии на их дробление и помол. Стекловидные гранулированные шлаки вследствие аморфного строения, внутренних напряжений и многочисленных дефектов легко подвергаются измельчению и при использовании их в качестве сырья для производства вяжущих веществ обеспечивают повышенные прочностные характеристики до  $15\text{—}30\text{—}40$  МПа при нормальном твердении ( $18\text{—}20^\circ\text{C}$ ), пропаривании ( $80\text{—}95^\circ\text{C}$ ) и запаривании ( $175^\circ\text{C}$ ) соответственно.

Поэтому в дальнейшем в качестве основного сырья для производства вяжущих веществ и тонкодисперсных заполнителей для ячеистых бетонов будут рассматриваться только гранулированные шлаки различных производств. Характеристики закристаллизованных отвальных шлаков приводятся только для сравнения.

Анализ данных химического состава доменных шлаков, представленных в табл. 1, свидетельствует о повышенном содержании в них основных окислов ( $\text{CaO} + \text{MgO}$ ) от  $45$  до  $51\%$ , что соответствует  $M_o = 0,89\text{—}1,15$ . Содержание кремнезема находится в пределах  $36\text{—}38\%$ , глинозема  $6\text{—}17\%$ , т. е. модуль активности колеблется от  $0,16$  до  $0,53$ . Таким образом, с понижением модуля основности возрастает модуль активности, и наоборот. Аналогичная закономерность прослеживается и на шлаках других видов. Проведенными ранее исследованиями [10, 50] установлено, что доменные гранулированные шлаки при среднем значении  $M_o = 1,2\text{—}0,9$  обладают достаточной гидравлической активностью с самостоятельно выраженными вяжущими свойствами, которая резко повышается при сульфатно-щелочной активизации. Кроме того, гидравлическая активность данных шлаков обеспечивается повышенным модулем активности (от  $0,34$  до  $0,53$ ), а также наличием стекловидной фазы в ко-

Таблица 2. Свойства различных видов молотых шлаков и зол

Вид сырья	Водопотребность для теста нормальной густоты, %	Прочность при сжатии, МПа		Объемные изменения на приборе Ле Шателье, мм			Поглощение СаО в мг/г заполнителя		
		пропаривание при 90° С	запаривание при 175° С	нормальное твердение при 20° С	пропаривание при 90° С	запаривание при 175° С	нормальное твердение при 20° С	пропаривание при 90° С	запаривание при 175° С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>I. Высококальциевые шлаки <math>\text{CaO} + \text{MgO} &gt; 45\%</math></b>									
Доменные шлаки Юга и Центра:									
гранулированные	29	2,5—5	4,5—10	1,2	1,5	2	25	37	55
отвалы	27	—	3,5—5	—	—	1,5	5	24	75
Шлаки электротермического производства фосфора, гранулированные	27	1,5—3	2,5—5	0,6	1	1,5	45	75	100
<b>II. Среднекальциевые шлаки <math>\text{CaO} + \text{MgO} &lt; 45\%</math></b>									
Доменные шлаки Урала и Сибири:									
гранулированные	28	1,5—3	2—6	0,5	1,1	1,6	55	100	150

отвальные	26	—	1—2,5	—	—	1,2	15	55	150
Мартеновские шлаки (отвальные)	25	—	5—7,5	—	—	1	10	25	75
<b>III. Низкокальциевые шлаки <math>\text{CaO} + \text{MgO} &gt; 20\%</math></b>									
Топливные шлаки канск-ачинских углей, гранулированные	28	—	1,5	—	—	0,6	35—75	150—180	200
<b>IV. Сверхкислые шлаки <math>\text{CaO} + \text{MgO} &lt; 10\%</math></b>									
Гранулированные шлаки цветной метал- лургии	26	—	—	—	—	—	45—65	130—175	200—250
Топливные гранулиро- ванные шлаки донецких, подмосковных и других углей	28	—	—	—	—	—	50—75	125—170	200—280
Ваграночные шлаки (отвальные)	26	—	—	—	—	0,5	10	55	140—200
<b>V. Высококальциевые пылевидные золы <math>\text{CaO} &gt; 20\%</math></b>	60—58	5—7	8—10	4	6	10	—	—	—
<b>VI. Угольные сульфато- содержащие золы</b>	60—55	2,5—3,5	3,5—5,6	2	5	12	—	—	—
<b>VII. Низкокальциевые пылевидные золы <math>\text{CaO} &lt; 20\%</math></b>	65—52	—	—	—	—	—	30—50	100—150	200

личестве 70—90%. При тепловлажностной обработке гранулированных молотых шлаков активность возрастает в 2—3 раза. Так, прочность при сжатии молотых доменных гранулированных шлаков Юга с содержанием  $\text{CaO} > 45\%$  после пропаривания составила 2,5—5 МПа, а после запаривания 4,5—12 МПа, шлаков Урала и Сибири с содержанием  $\text{CaO} < 45\%$  соответственно 1,5—3 и 2—6 МПа. При этом необходимо отметить не соответствие количества поглощенной  $\text{CaO}$  в мг одним граммом молотого шлака из насыщенного щелочного раствора (табл. 2). При нормальных условиях (18—20° С) количество поглощенного  $\text{CaO}$  для шлаков Юга составило 10—25 мг/г при пропаривании до 20—37 мг/г и запаривании до 40—55 мг/г. В то же время для шлаков среднекальциевых количество поглощенной  $\text{CaO}$  в зависимости от температурного фактора увеличивается в 1,5—3 раза и находится в пределах 30—55; 65—100; 90—150 мг/г соответственно.

Таким образом, чем выше содержание  $\text{CaO} + \text{MgO}$  в шлаках, тем ниже степень поглощения  $\text{CaO}$  на 1 г шлака, и наоборот. В то же время прочность при сжатии возрастает с уменьшением количества  $\text{CaO}$ , поглощенной 1 г шлака из насыщенного щелочного раствора. Это обстоятельство объясняется собственной гидратацией основных гранулированных шлаков с выделением  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в раствор. В среднекальциевых шлаках повышенное содержание кислотных окислов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ) ( $M_a = 0,3—0,53$ ) способствует активному поглощению  $\text{CaO}$  из щелочного раствора, особенно при повышенных температурах.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что степень гидравлической активности шлаков, установленная поглощением  $\text{CaO}$  в мг/г, не соответствует вяжущим свойствам шлаков, т. е. их прочностным характеристикам, и зависит от содержания  $\text{CaO}$ , стеклофазы,  $M_o$  и  $M_a$  в исходном материале и температуры твердения. Это необходимо учитывать при назначении оптимальных составов при изготовлении шлакозольных вяжущих. При мартеновском процессе образуются как основные, так и кислые шлаки. Так, шлаки завода «Станколит» характеризуются модулем основности 0,73 и модулем активности 0,27, а основной шлак завода «Серп и молот» соответственно 2,12 и 0,06.

Содержание кремнезема в них колеблется от 22 до

39%, а глинозема от 1,5 до 10%. Мартеновские шлаки, как правило, содержат включения металла, поэтому их не гранулируют, а сливают в отвалы, где они и кристаллизуются. Молотый высокоосновный закристаллизованный шлак завода «Серп и молот» проявляет вяжущие свойства только при запаривании в автоклаве. Количество поглощенной СаО на 1 г шлака при температуре 20°С, при пропаривании и запаривании составляет соответственно 10, 25, 75 мг/г при прочности при сжатии только после запаривания 5—7,5 МПа.

Ваграночный отвальный шлак завода им. Войкова содержит 48% кремнезема, 15% окиси алюминия, СаО+MgO около 10%, что соответствует  $M_o=0,15$  и  $M_a=0,3$ .

По содержанию СаО+MgO этот шлак относится к сверхкислоту с ярковыраженными пуццоланическими свойствами. При температуре 18—20 и 90—95°С молотый отвальный шлак почти инертен, количество поглощенной СаО составляет 10 и 55 мг/г. С повышением температуры до 175°С поглощение СаО возрастает в 3—4 раза и находится в пределах 150—200 мг/г. При этом самостоятельными вяжущими свойствами шлак не обладает. Шлаки электротермического производства фосфора высококальциевые и характеризуются повышенным модулем основности до 1—1,02 и пониженным модулем активности 0,1. Степень поглощения СаО гранулированными фосфорными шлаками низкая и составляет 20—35—58 мг/г при температурах 20, 95, 175°С. В этом случае шлаки обладают собственными вяжущими свойствами, которые обеспечивают прочность при сжатии после пропаривания 3,5 МПа и после запаривания 8,5 МПа.

Энергетические гранулированные шлаки и пылевидные золы в основном обладают пуццоланическими свойствами, т. е. повышенной способностью взаимодействовать с введенной в них окисью кальция. Это свойство предопределяется высоким содержанием кислотных оксидов, сумма которых составляет  $(SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3)$  90—98%. Такие молотые шлаки жидкого удаления и пылевидные золы способны поглотить до 50—75; 120—170; 200—270 мг/г СаО из насыщенного щелочного раствора при увеличении температуры среды с 20—95 до 175°С. Модуль основности сверхкислых шлаков и зол находится в пределах от 0,07 до 0,01, а модуль активности от



0,34 до 0,8. Собственными вяжущими свойствами эти отходы не обладают (табл. 2) [34].

Шлаки и золы, образующиеся от сжигания углей Канск-Ачинского бассейна, Райчихинского, Волчанского месторождений, характеризуются повышенным содержанием  $\text{CaO} + \text{MgO}$  до 20—35% и относятся к высококальциевым энергетическим отходам. Содержание кремнезема в них колеблется от 35 до 46%, глинозема от 8 до 12%. При этом  $\text{Mo}$  составляет 0,45—0,5 и  $\text{Ma} = 0,11$ —0,18. В указанных пылевидных золах  $\text{CaO} + \text{MgO}$  находится частично в свободном состоянии (до 5—15%), что обеспечивает самостоятельное твердение, которое характеризуется прочностью при сжатии после пропаривания в 5—7 МПа и после запаривания 8—11 МПа.

Высокоосновные молотые топливные гранулированные шлаки обнаруживают «собственные» вяжущие свойства только после запаривания. Аналогичными свойствами обладают высококальциевые сульфатосодержащие пылевидные золы, полученные в результате сжигания сернистых углей с последующим связыванием  $\text{SO}_2$  за счет введения в топку известняка.

Таким образом, анализ исследований показал, что молотые гранулированные шлаки, состоящие из стеклофазы в пределах 70—90%, и пылевидные золы обладают гидравлическими свойствами в зависимости от количественного содержания в них основных окислов  $\text{CaO} + \text{MgO}$ . При этом можно разделить исследуемые шлаки и золы, независимо от условий их образования, на четыре группы (рис. 2, 3):

- 1) высококальциевые  $\text{CaO} > 45\%$ ;
- 2) среднекальциевые  $\text{CaO} < 45\%$ ;
- 3) низкокальциевые  $\text{CaO} > 20\%$ ;
- 4) сверхкислые  $\text{CaO} < 10\%$ .

Высококальциевые и среднекальциевые шлаки и золы в первую очередь целесообразно использовать в качестве сырья для производства вяжущих веществ, а низкокальциевые и сверхкислые шлаки и золы главным образом следует использовать в качестве активных заполнителей в ячеистых бетонах.

В проведенной работе при определении гидравлических свойств шлаков и зол прочностные характеристики гранулированных шлаков и активность их по поглощению  $\text{CaO}$  из насыщенного раствора определялись для тонкомолотых шлаков с удельной поверхностью в преде-

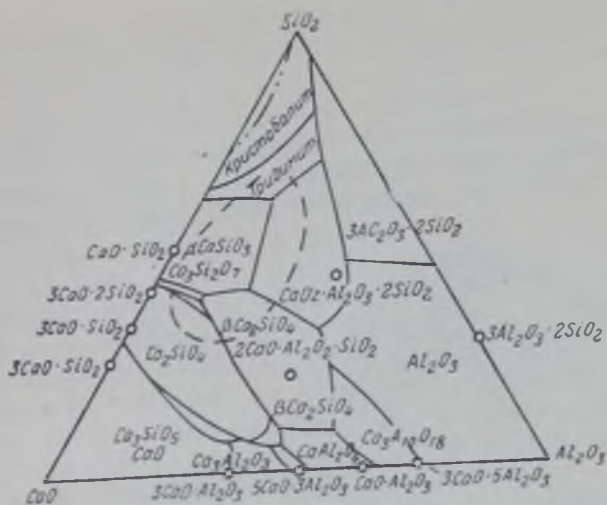


РИС. 2. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

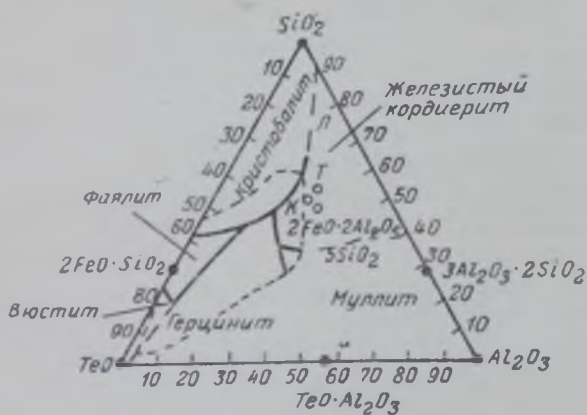


РИС. 3. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ  $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{FeO}$

лах 2800—3000  $\text{см}^2/\text{г}$ . Аналогичные исследования для пылевидных зол проводили после дополнительного их измельчения до удельной поверхности 3000—3200  $\text{см}^2/\text{г}$ . Водопотребность измельченных стекловидных шлаков для теста нормальной густоты составляет 26—30%. Бóльшее значение  $B/T$  приходится на высококальциевые шлаки (28—30%) и меньшее (26—27%) на кислые шла-

ки электростанций, цветной металлургии и ваграночные. Для пылевидных зол водопотребность в два раза выше и достигает 55—65%.

Неравномерность изменения объема при пропаривании и запаривании определялась на приборе Ле Шателье с помощью разрезного кольца. Все молотые гранулированные шлаки это испытание выдержали. Приращение объема затвердевшего теста нормальной густоты, фиксируемое раздвижкой игл, было в пределах от 0,5 до 1,2 мм при твердении в обычных условиях, от 1,1 до 1,5 мм при пропаривании и от 0,5 до 2 мм при запаривании в автоклаве.

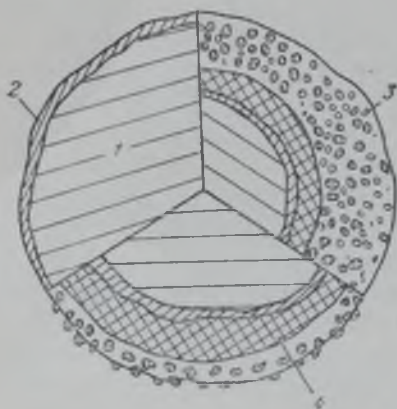


РИС. 4. СХЕМА ГИДРАТАЦИИ ШЛАКОЗОЛЬНОГО СТЕКЛА

1 — неизменное стекло; 2 — зона гидратации стекла; 3 — зона выщелачивания глинозема; 4 — зона кристаллизации гидрогранатов и гидросиликатов кальция переменного состава

Затвердевшие образцы из немолотой пылевидной золы Канск-Ачинского угля с содержанием  $\text{CaO} + \text{MgO}$  10—15% в свободном состоянии характеризовались приращением объема в 12, 18, 27 мм при твердении при температурах 18—20; 90—95 и 175° С, а после дополнительного

помола 4, 6, 10 мм соответственно. Образцы из сульфатосодержащих зол также увеличились в объеме с повышением температуры твердения до 2,5; 5 и 12 мм.

Микроскопические исследования подвергнутых тепловой обработке образцов из шлаков и зол с введенными в них активизатора твердения — извести — показали, что существует отчетливая зональность в строении зерен гидратированного шлакового и зольного стекла, отражающая стадийность процесса гидратации их. Можно выделить 4 зоны, отражающие в основном поведение глинозема и кремнезема при твердении. Схематическая зарисовка зерна гидратированного шлакозольного стекла с выделением этих зон дана на рис. 4.

1. Зона неизменного шлакозольного стекла.

II. Зона гидратации стекла — проникающие в нее гидроксильные ионы гидратируют стекло с образованием гелевидных гидратов кремнезема и глинозема. Толщина зоны весьма невелика — меньше 0,5 мкм.

III. Зона выщелачивания глинозема — известковый раствор, подходящий к этой зоне, характеризуется пониженной концентрацией ионов кальция вследствие интенсивного связывания их при кристаллизации гидрогранатов в четвертой зоне. Поскольку наибольшая растворимость  $Al_2O_3$  наблюдается именно при пониженной концентрации  $CaO$  (0,32—0,33 г/л при 90—120°С), происходит выщелачивание гидрата глинозема с выносом в четвертую зону. Некоторая часть ионов кальция адсорбируется гелем кремнезема. Здесь же возникают высоко- и низкоосновные гидросиликаты  $Ca$ . Толщина зоны до 3—8 мкм, она хорошо видна под микроскопом.

IV. Зона кристаллизации гидрогранатов — в ней взаимодействуют насыщенный раствор  $Ca(OH)_2$ , поступающий из межзернового пространства, и богатый глиноземом (насыщенный также и кремнеземом) раствор из зоны III. Резкое повышение концентрации  $CaO$  при смешивании двух растворов приводит к выпадению в осадок глинозема, кристаллизующегося совместно с  $CaO$  и кремнеземом в виде наименее растворимой фазы — гидрогранатов. Центрами кристаллизации служат мелкие посторонние кристаллики  $[Ca(OH)_2, CaCO_3]$  и частицы геля.

Первоначально кристаллизация гидрогранатов происходит на поверхности частиц гидратированного стекла, а в дальнейшем — среди геля кремнезема и гидросиликатов кальция. Максимальная толщина этой зоны 15—20 мкм наблюдается у высокоосновных запаренных при 250°С образцов, минимальная в 1—3 мкм — у пропаренных образцов.

Более подробно рассмотрены процессы твердения для шлаков и зол с различным содержанием глинозема, кремнезема и других окислов.

Стеклофаза гранулированных шлаков и зол является двухкомпонентным материалом, содержащим упорядоченные участки, близкие по составу (аморфиты) и строению (кристаллиты) соответствующим кристаллическим фазам, но с высокой удельной поверхностью, и собственно неупорядоченные глиноземисто-кремнеземистые прослойки между такими участками.

Гидравлическая активность кристаллитов в стекле превышает активность соответствующих минералов.

Аморфиты, преобладающие в составе шлаковых стекол, имеют рыхлую субмикроструктуру и относительно высокую проницаемость, обусловленную наличием пустот между нонными группировками. Поэтому они легко гидратируются и гидролизуются.

Активность промежуточного аморфного вещества определяется соотношением глинозема и кремнезема: чем больше в нем глинозема, тем легче оно гидратируется в щелочной и в сульфатно-щелочной средах. В нейтральной среде аморфное вещество устойчиво. В образцах автоклавного твердения преобладают гидрогранаты.

При снижении содержания глинозема в промежуточном веществе шлакового стекла уменьшается его реакционная способность. В продуктах взаимодействия этого вещества с известью и гипсом повышается содержание гидросиликатов кальция при соответствующем снижении количества глиноземосодержащих новообразований — гидрогеленита, гидрогранатов и гидросульфоалюминатов кальция.

Кремнеземистое промежуточное вещество состава кварцевого стекла реагирует с гидратом окиси кальция медленнее, чем глиноземисто-кремнеземистое (при одинаковых условиях твердения). Соответственно образцы приобретают меньшую прочность. Гипс в этом случае не увеличивает скорости твердения и прочности образцов.

В результате взаимодействия при температурах 20—200°С образуются гидросиликаты кальция с основностью, зависящей от продолжительности твердения и соотношения концентраций CaO в жидкой фазе.

Реальные шлаковые расплавы и гранулированные шлаки имеют сложный многокомпонентный химический состав и могут включать разные аморфиты и кристаллиты.

Стекла системы  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  с отношением  $\text{Al}_2\text{O}_3$  к  $\text{SiO}_2$  от 0,3 до 0,9 характеризуются гидратацией и гидролизом аморфитов и кристаллитов состава ортосиликата с возникновением цементирующего вещества из преобладающих субмикроструктурных гидросиликатов кальция.

Аналогичные процессы протекают как при известковой, так и при сульфатной активизации. В последнем случае в цементирующем веществе возникают гидросуль-

фоалюминаты кальция, играющие положительную роль в твердении вяжущих при низких (менее 0,7 г/л) концентрациях СаО в жидкой фазе.

Увеличение концентрации СаО в жидкой фазе и повышение температуры твердения от 20 до 100°С приводит к ускорению гидролиза стекла, но ухудшает микроструктуру цементирующего вещества из-за перехода пластинчатых гидроалюминатов кальция и гидрогеленита в изометричные фазы —  $C_3AH_6$  и гидрогранаты, а также быстрой кристаллизации и последующего разрушения гидросульфоалюминатов кальция. В меньшей степени эти деструктивные процессы отражаются на низкоглиноземистых стеклах (менее 20%  $Al_2O_3$ ), твердение которых связано с образованием гидросиликатов кальция. Гидрогранаты в цементирующем веществе играют подчиненную роль, а при содержании  $Al_2O_3$  в стекле менее 5% могут и вообще отсутствовать, так как в этом случае происходит замещение кремния в тоберморите алюминием и последний полностью входит в состав субмикроструктурной гидросиликатной связи.

При клинкерной, известковой и сульфатной активизации автоклавная обработка изменяет характер твердения, что сказывается положительно на прочности. В условиях запаривания содержание глинозема в стеклофазе не должно превышать 5—12%. Падение прочности отмечается у составов, содержащих более 55%  $SiO_2$ , что обусловлено уменьшением скорости их гидратации и гидролиза. Пониженная прочность характерна также для высокоосновных стекол (отношение СаО:  $SiO_2$  более 1,2%) при известковой активизации, при автоклавном твердении таких вяжущих образуются преимущественно высокоосновные кристаллические гидросиликаты кальция  $C_2SH(A)$  или  $C_2SH(C)$ . В этих случаях необходимо вводить тонкоизмельченный кварцевый песок и другие плотные кремнеземистые добавки.

Увеличение температуры автоклавной обработки для стекол системы СаО —  $Al_2O_3$  —  $SiO_2$  до 200°С и более приводит к росту прочности образцов. Для продуктов твердения при высокотемпературной водотепловой обработке типично присутствие тоберморита, ксонотлита и  $C_2SH(C)$ .

Присутствие MgO в исходных расплавах системы СаО —  $Al_2O_3$  —  $SiO_2$  ускоряет процессы гидратации и гидролиза стекла, а MnO снижает прочность вяжущих из

шлаковых стекол. Это объясняется замедлением процессов гидратации и гидролиза стеклофазы, содержащей ионы двухвалентного марганца. ВаО также увеличивает активность стекла, особенно при использовании сульфатно-клинкерной активизации.

Кроме того, установлено, что увеличение содержания FeO до 30% сопровождается некоторым повышением активности стекла, обусловленным деполимеризацией кремнекислородных анионов, особенно заметным в составах с малым количеством СаО в исходном стекле. Дальнейшее увеличение железистости расплава обуславливает быстрый спад прочности.

О влиянии на гидравлическую активность стекол трехвалентного железа данных очень мало. Имеющиеся сведения свидетельствуют о том, что это влияние является отрицательным. Таким образом, цементирующее вещество шлакозольных вяжущих и по фазовому составу и по структуре незначительно отличается от цементного камня портландцемента, известково-песчаного вяжущего автоклавного твердения и может служить основой для получения бетонов как с плотными и пористыми заполнителями, так и бетонов с ячеистой структурой.

## 2. ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА ИЗ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ШЛАКОВ И ПЫЛЕВИДНЫХ ЗОЛ

Оптимальные составы шлаковых и зольных вяжущих разработаны на кафедре технологии вяжущих веществ и бетонов МИСИ им. В. В. Куйбышева более чем для 60 видов шлаков и зол [22].

Для изготовления ячеистобетонных изделий в работе использовали бесклинкерные и малоклинкерные вяжущие из высоко-, средне- и низкокальциевых шлаков и зол, а также новые виды шлакопортландцементов, приготовленных на основе фосфшлаков, шлаков цветной металлургии и топливных гранулированных шлаков.

Шлаки и золы и оптимальные составы вяжущих на их основе выбирали и назначали в соответствии с заданными прочностными показателями не менее 15--20 МПа сразу после тепловой обработки.

Однако, как известно, прочность зависит от структуры цементного камня и деформативных изменений, протекающих в процессе твердения вяжущего, а также при длительном нахождении его в различных условиях (в во-

де, на воздухе, в агрессивных средах и т. п.). В то же время, структура цементирующего шлакозольного вещества, определяющая его важнейшие физико-механические свойства — прочность и деформативность, обусловлена свойствами сырьевых материалов, составом вяжущего и условиями твердения. Результаты испытаний уже затвердевшего вяжущего позволяют только фиксировать его свойства при данной сложившейся структуре, а не вскрывать причины, предопределяющие их. Чтобы получать вяжущее с заданными техническими свойствами, необходимо управлять формированием структуры цементирующего вещества в процессе его твердения.

В результате проведенных работ установлено, что напряжения, зависящие от степени гидратации вяжущих, коэффициентов линейного расширения их составляющих и других факторов, определяют степень деформативных изменений в теле затвердевшего вяжущего. Особая необходимость в определении деформативных изменений возникает при использовании вяжущих, в состав которых входят известь или новые виды сырья — шлаки, золы и др. Форсированные процессы твердения вяжущих в условиях повышенных температур  $90—175^{\circ}\text{C}$  также способствуют возникновению повышенных напряжений, усугубляющих деструктивные изменения в цементирующем веществе.

В большинстве случаев оптимальные составы смешанных вяжущих, а также условия и режимы тепло-влажностной обработки для них подбирают экспериментальным путем, преимущественно по прочностным показателям затвердевшего вяжущего.

По-видимому, микротрещины, возникающие в процессе твердения, не оказывают существенного влияния на прочность свежезатвердевших вяжущих, но вызывают образование дефектной структуры цементирующего вещества, что влияет на долговечность материала.

С целью изучения деформативных изменений, протекающих в процессе твердения шлакозольных вяжущих и бетонов на их основе, предлагается комплексная методика этих определений (рис. 5), включающая:

1) определение линейных деформаций на образцах-балочках в формах и без форм (мм/м);

2) определение деформативных изменений на приборе Ле Шателье с помощью разрезного кольца с иглами вместо лепешек (мм);



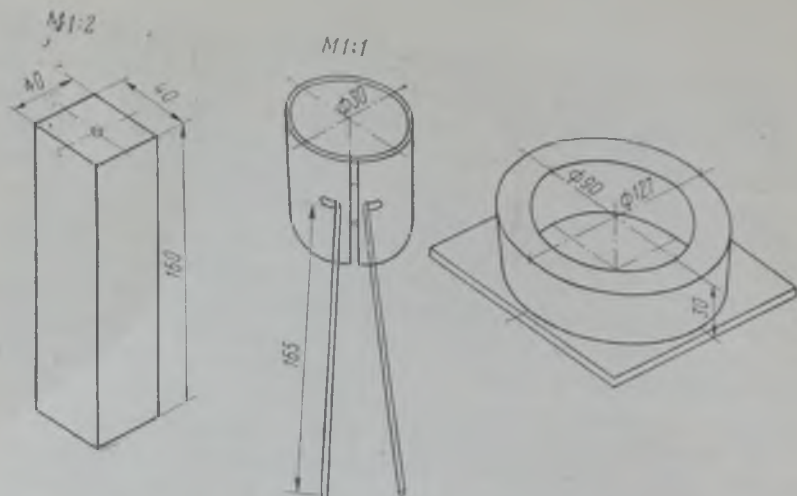


РИС. 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАТИВНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ШЛАКОЗОЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ НА ПРИБОРЕ ЛЕ ШАТЕЛЬЕ, КОЛЬЦАХ ЛЕРМИТА И ОБРАЗЦАХ-БАЛОЧКАХ РАЗМЕРОМ 4X4X16 СМ

3) определение трещинообразования при помощи кольцевого метода (на кольцах Лермита).

Результаты исследований, полученные для известково-шлаковых и зольных вяжущих, позволяют сказать, что предлагаемое разделение деформаций по видам определений способствует более полному раскрытию причин деформативных изменений в целом, а самое главное, позволяет устранять их в каждом отдельном случае.

В исследованиях было установлено, что вяжущие и бетоны с повышенными линейными деформациями (до 2—4 мм/м) характеризуются и пониженной трещиностойкостью. Достаточно надежным критерием, определяющим допустимые и недопустимые напряжения, являются объемные изменения на приборе Ле Шателье, на которые оказывают влияние повышенное содержание пережженных частиц  $\text{CaO} + \text{MgO}$  как в извести, так и в золах, тонкость помола вяжущего, его водопотребность и т. п.

При изучении деформативных свойств затвердевшего вяжущего или бетона определение линейных, объемных деформаций, трещинообразования по предлагаемой методике производится на твердеющих образцах и на затвердевших образцах при длительном их нахождении в различных средах.

Таким образом, используя предлагаемую методику, можно качественно оценить новое сырье в сравнении с традиционным, назначить оптимальные составы шлакозольных вяжущих, технологические приемы обработки сырья, условия и режимы их твердения. Это позволяет управлять формированием структуры твердеющих вяжущих и получать цементный камень с заданными техническими свойствами.

Для шлакозольных вяжущих, которые были использованы при изготовлении ячеистого бетона, исследовались изменения прочностных и деформативных характеристик в зависимости от изменения дисперсности молотых шлаков и зол, а также составов вяжущих, температурных режимов твердения и длительности нахождения затвердевших шлакозольных вяжущих в воде, на воздухе, в среде углекислоты. Выбранные условия близки к эксплуатационным и анализ полученных данных может свидетельствовать о долговечности шлакозольных вяжущих данных составов. Вяжущие готовили совместным помолом шлака или золы с активизаторами твердения до требуемой дисперсности. Исследования проводили на образцах размером  $4 \times 4 \times 16$  см из теста нормальной густоты и пластичных растворов состава 1:3 (по массе), а также на приборах Ле Шателье и кольцах Лермита.

Результаты исследований влияния степени измельчения шлаковых и зольных вяжущих на их свойства представлены в табл. 3 и на рис. 6.

С увеличением удельной поверхности шлаковых вяжущих от 1850—2000 до 3100—3500  $\text{см}^2/\text{г}$  (по шлаку), изготовленных на основе высококальциевых стекловидных шлаков, прочность при сжатии возрастает в два раза, средне- и низкокальциевых — в 1,5 раза. Для вяжущих из сверхкислых шлаков (топливный гранулированный шлак московской ТЭЦ-11, никелевый гранулированный шлак) увеличение дисперсности способствует повышению прочности только на 25—30%.

С увеличением количества извести (с 10 до 20%), введенной в состав вяжущих в качестве активизатора твердения, возрастает процентное содержание несвязанной  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в затвердевших образцах после пропаривания с 2,5 до 4,8% и после запаривания с 0,2 до 0,9%.

С увеличением тонкости помола вяжущих до 7000—8000  $\text{см}^2/\text{г}$ , а по шлаку 5800—6500  $\text{см}^2/\text{г}$  гидроксид кальция

26 Таблица 3. Прочность и деформации шлакозольных вяжущих оптимальных составов в зависимости от степени их измельчения

Виды сырья		Содержание свободных CaO + MgO, %			Объемные изменения на приборе Ле Шателье, мм		Полная усадка, мм/м		Прочность при сжатии, МПа, после	
удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г		в исходном материале	после пропаривания при 90°С в течение 2+10 ч	после запаривания при 175°С 2+8+2 ч	пропаривание	запаривание	пропаривание	запаривание	пропаривания	запаривания
молотого шлака	шлакового вяжущего									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Сухой помол

I. Доменный гранулированный шлак Ждановского завода 85 : 10 : 5 (шлак : известь : гипс)

1850	2900	7,8	2,51	Следы	2,24	2,6	1,12	0,52	13	17
3500	4700	7,6	0,8	Нет	1,5	2,05	1,05	0,48	20,3	36
6500	8000	7,93	Нет	»	1,1	1,62	1,47	0,76	40	51,5

II. Доменный гранулированный шлак Челябинского завода 80 : 15 : 5  
(шлак : известь : гипс)

2000	2850	11,62	3,7	0,4	2,75	2,92	1,1	0,49	13,2	17,5
3150	5080	11,71	2	0,01	1,92	2,25	0,99	0,43	19	31,8
5880	7900	11	0,6	Нет	1,64	1,8	1,39	0,71	38	49,3

III. Доменный гранулированный шлак Новокузнецкого завода 80 : 15 : 5  
(шлак : известь : гипс)

2200	3010	12	3,58	0,2	2,62	2,9	1	0,52	16	21
3080	4920	11,57	1,97	Следы	1,75	2,15	0,89	0,45	27,5	36,1
5900	8080	11,83	0,62	Нет	1,6	1,78	1,42	0,7	39,7	51,9

IV. Никелевый гранулированный шлак 75 : 20 : 5  
(шлак : известь : гипс)

1810	2970	14,59	4,18	0,5	2,76	3,01	1,49	0,55	15	20,5
3500	4640	15,25	2,91	0,08	1,8	2,26	1,25	0,6	21,6	25,8
6700	8000	15,3	1,38	Нет	1,58	1,9	1,39	0,89	25,3	30,3

V. Топливный гранулированный шлак московской ТЭЦ-11 75 : 20 : 5  
(шлак : известь : гипс)

1990	3000	14,2	4,8	0,9	2,5	3,05	1,39	0,93	12	15,7
3100	5500	14,61	3,11	0,03	1,81	2,5	1,27	0,81	16	20
6500	7900	14,19	1,09	Нет	1,1	1,53	1,3	0,92	21,5	27,5

Виды сырья		Содержание свободных CaO+MgO, %			Объемные изменения на приборе Ле Шателье, мм		Полная усадка, мм/м		Прочность при сжатии, МПа, после	
		удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	в исходном материале	после пропаривания при 90°С в течение 2+10 ч	после запаривания при 175°С 2+8+2 ч	пропаривание	запаривание	пропаривание	запаривание	пропаривания
молотого шлака	шлакового вяжущего									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
VI. Пылевидная зола ТЭЦ-11 60 : 35 : 5 (зола : известь : гипс)										
2800	4000	24,9	4,21	1,48	3	3,5	2,5	1,62	7,8	20
3640	5700	25,3	2,16	Следы	2,2	2,7	2,58	1,59	9,6	22,7
VII. Топливный гранулированный шлак Назаровской ГРЭС 80 : 15 : 5 (шлак : известь : гипс)										
1910	3020	12	3,44	Следы	2,8	3,05	1,2	0,79	11,3	14,9
3400	5400	12,17	1,85	Нет	1,87	2,3	1,3	0,9	17,2	25,2
6600	7900	11,98	0,64	»	1,66	1,89	1,52	1,09	20,7	34,1
VIII. Пылевидные золы Назаровской ГРЭС 70 : 25 : 5 (зола : известь : гипс)										
2900	4700	20,7	5,91	2,53	8,6	12,3	2,66	1,48	10	25
4300	5600	20,54	3,87	1,05	4,9	7	2,3	1,6	16,5	27,1

Мокрый помол

I. Доменный гранулированный шлак Ждановского завода 85 : 10 : 5  
(шлак : известь : гипс)

3000	4500	7,43	1,89	Нет	1,05	1,51	1,12	0,54	20,8	37,7
5900	7100	7,68	0,06	»	0,73	1,09	1,49	0,81	40,5	51

II. Топливный гранулированный шлак ТЭЦ-11 75 : 20 : 5  
(шлак : известь : гипс)

2700	4000	12,9	2,52	Нет	1,15	1,54	1,31	0,86	16,4	20,4
5200	6900	13,95	0,03	»	0,6	0,94	1,37	0,92	21,9	28

III. Пылевидная зола ТЭЦ-11 60 : 35 : 15  
(зола : известь : гипс)

3800	5300	25	3,75	0,98	1,5	1,59	2,63	1,68	10,1	25,2
6900	7800	24,1	1,54	Следы	1,29	1,25	3,1	1,94	13,2	27

IV. Назаровская пылевидная зола 70 : 20 : 5  
(зола : известь : гипс)

3300	5400	21	3,4	1,21	1,3	1,5	2,14	1,56	10,5	27
4500	6300	19,97	1,5	Следы	0,87	0,98	2,23	1,56	16	29,3

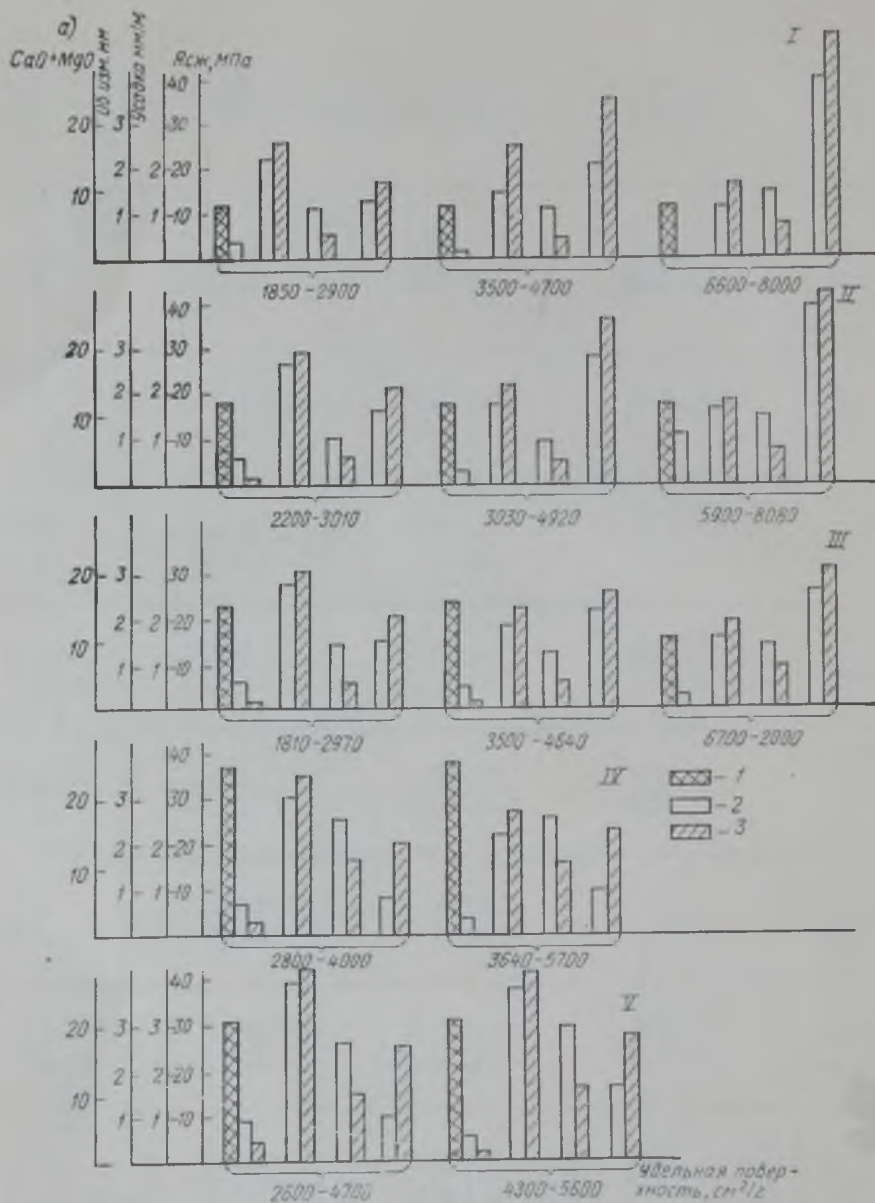
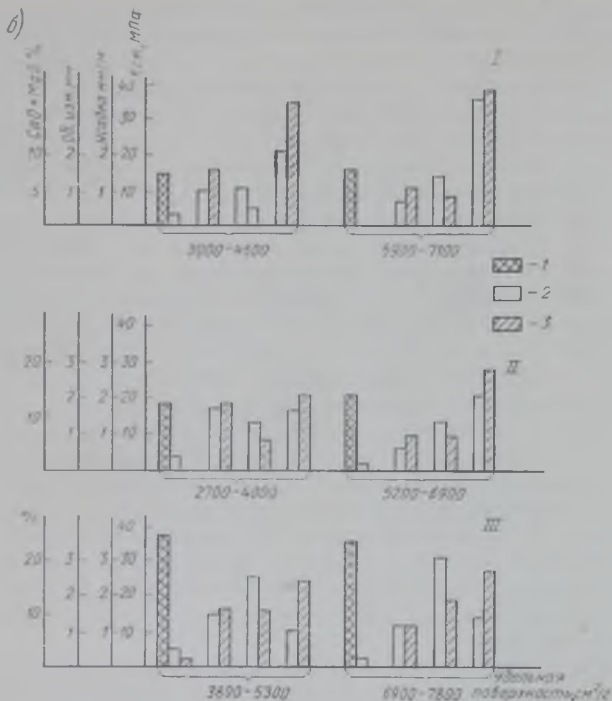


РИС. 6. ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ШЛАКОВЫХ И ЗОЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ НА ИХ ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА

а — сухой помол; б — мокрый помол; 1 — в исходном материале; 2 — пропаривание; 3 — запаривание



ция практически связывается полностью. При этом возрастает прочность при сжатии до 40—50 МПа для доменных шлаков и до 30 МПа для никелевых и топливных гранулированных шлаков. Свободная  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в затвердевших вяжущих после тепловлажностной обработки оказывает влияние на объемные их изменения в сторону увеличения при грубом помоле на 20—30%. С повышением дисперсности компонентов вяжущих объемные изменения уменьшаются и их значения находятся в пределах нормы, т. е. от 1,5 до 2 мм при пропаривании и от 1,9 до 2,5 мм при запаривании. При этом повышается и трещиностойкость образцов. Однако необходимо отметить, что повышенное содержание несвязанной  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  после пропаривания и запаривания обеспечивает стабильность прочностных характеристик при длительном нахождении затвердевших образцов в воде, на



воздухе и в углекислой среде. Это обстоятельство необходимо для бетонов ячеистой структуры, в которых свободная  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  будет являться активным фондом, обеспечивающим долговечность бесклинкерных шлакозольных вяжущих за счет возникновения новых дополнительных количеств продуктов гидратации при дальнейшем взаимодействии со стеклофазой шлаков и зол, а также вследствие образования  $\text{CaCO}_3$ .

На изменение линейных деформаций оказывает влияние вид шлака, дисперсность вяжущих и условия твердения. При помоле до удельной поверхности вяжущих от 4500 до 5100  $\text{см}^2/\text{г}$  полная усадка для пропаренных образцов, изготовленных на основе гранулированных шлаков с содержанием  $\text{CaO} + \text{MgO}$  45—25%, составила 0,8—1 мм/м, для запаренных — 0,43—0,48 мм/м. При грубом помоле усадочные деформации возрастают на 10—15%. Аналогичное увеличение усадки наблюдается и при сверхтонком помоле вяжущих. Однако причина возникновения повышенных усадочных деформаций различна. У вяжущих грубого помола возникающие в малом количестве новообразования не обеспечивают создания достаточно жесткого упрочненного скелета затвердевшего вяжущего, способного противостоять градиентным напряжениям, появляющимся при температурно-влажностных изменениях.

Увеличение усадок при сверхтонком измельчении вяжущих объясняется повышенной их водопотребностью (на 15—20%), предопределяющей возникновение пористой структуры цементирующего вещества. Вяжущие вещества из сверхкислых шлаков также имели повышенные усадочные деформации.

При мокром помоле шлаковых вяжущих содержание несвязанной  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  после тепловой обработки снижается в 1,5 раза, уменьшаются объемные изменения до 1—1,5 мм. Несколько возрастают усадочные деформации. Одновременно увеличивается прочность при сжатии, особенно для запаренных образцов из вяжущих, изготовленных на сверхкислых шлаках. В вяжущих на основе высококальциевой золы Назаровской ГРЭС содержание свободной  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  достигало 3,8—5,9% после пропаривания и 2,53—1,05% после запаривания; объемные изменения составили 4—8 и 7—12 мм соответственно. Усадочные деформации были в пределах 2,6—2,9 мм/м после пропаривания и 1,4—1,6 мм/м после запаривания.

Прочность при сжатии составила 10—15,5 и 25—27,1 МПа при тонкости помола вяжущего от 4700 до 5600 см<sup>2</sup>/г. Зольное вяжущее на пылевидной золе московской ТЭЦ-11 характеризовалось содержанием активных СаО+MgO от 1,4 до 4,2% в зависимости от тонкости помола и условий твердения. Объемные изменения были равны 3 и 2,2 мм после пропаривания и 3,5 и 2,7 мм после запаривания. Полная усадка пропаренных образцов находилась в пределах 2—2,5 мм/м, запаренных — 1,59—1,62 мм/м.

Мокрый помол зольных вяжущих существенно снижает содержание несвязанной Са(ОН)<sub>2</sub> в затвердевших образцах и нормализует объемные приращения (табл. 3). Водопоглощение растворных образцов на шлакозольных вяжущих снижается с возрастанием величины тонкости помола на 10—15%, что объясняется уплотнением структуры затвердевших образцов за счет возникновения новообразований в большем количестве при их повышенной удельной поверхности.

При грубом помоле вяжущие выдерживают 15—25 циклов-смен замораживания при —18—20°С и оттаивания. С увеличением удельной поверхности шлаковых вяжущих до 4000—5000 см<sup>2</sup>/г морозостойкость повышается до 75—100 циклов, а для зольных вяжущих до 50—75 циклов. Введение портландцемента в количестве 10—15% в состав зольных вяжущих и в вяжущие, изготовленные на основе сверхкислых шлаков, способствует увеличению морозостойкости до 100 и более циклов.

Однако увеличение тонкости помола шлакозольных вяжущих от 1500 до 3000 см<sup>2</sup>/г (по шлаку или золе) требует увеличения времени помола в 1,5—2 раза, а от 3000 до 6000 см<sup>2</sup>/г — в 5—10 раз. При этом расход электроэнергии повышается соответственно от 15 до 150 кВт·ч. Затраты электроэнергии для размалывания шлакозольных вяжущих до удельной поверхности 4000—5500 см<sup>2</sup>/г практически равны затратам на размалывание цементного клинкера до той же тонны.

Большое влияние на прочностные и деформативные свойства шлакозольных вяжущих оказывают температура воды затворения, введение ускорителя твердения — СаСl<sub>2</sub> в количестве 2% и, главным образом, температура и условия твердения, а также время выдержки после тепловой обработки (табл. 4, рис. 7).

Для исследования поставленных вопросов автор про-

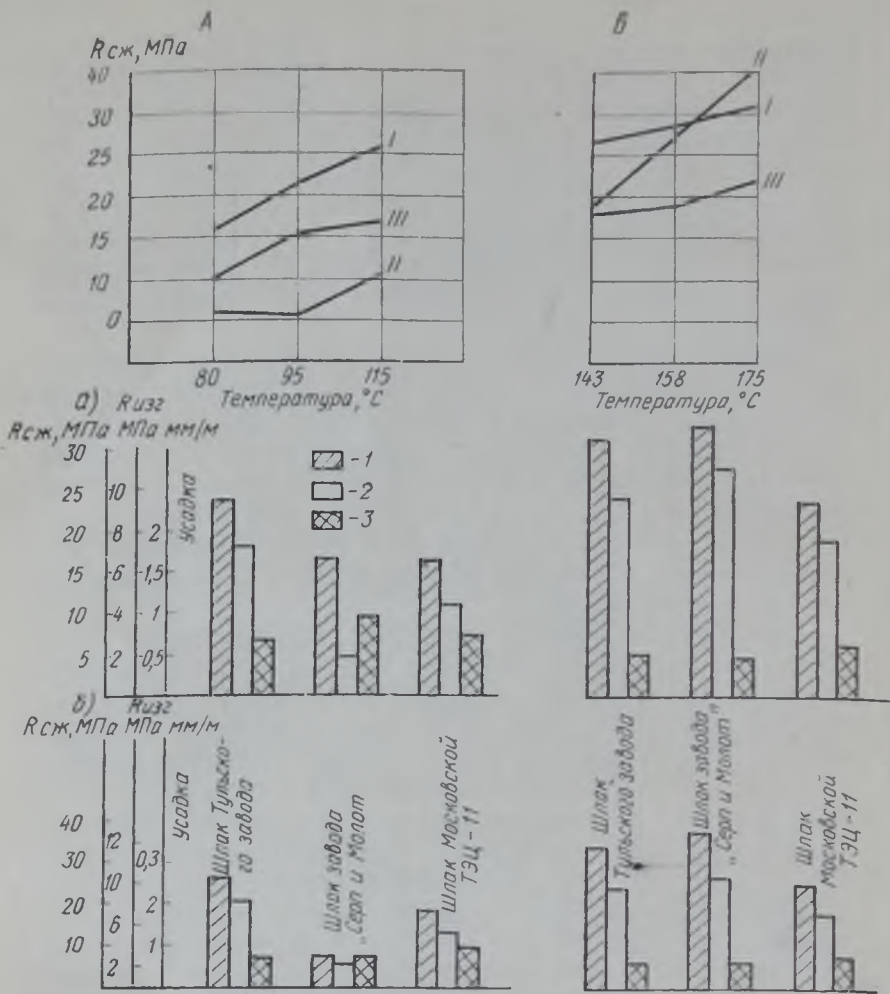


РИС. 7. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, УСЛОВИЙ И РЕЖИМОВ ТВЕРДЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛАКОВЫХ И ЗОЛЬНЫХ ВЯЗУЩИХ

1 — прочность при сжатии; 2 — прочность при изгибе; 3 — усадочные деформации; а — формирование при 80° С; б — формирование с добавкой 2% CaCl<sub>2</sub>; А — пропаривание; Б — запаривание

вел опыты при температуре паровой обработки 80, 95, 115, 128, 143, 158 и 175° С. Образцы из пластичных растворов выдерживали при заданной температуре 8 и 10 ч. Приведенные данные показывают, что тепловлажностная

обработка при 90—95°С является по сравнению с 80°С наиболее эффективной, что соответствует прочности при сжатии для вяжущих из доменного гранулированного шлака в пределах 20—21,5 МПа, из топливных гранулированных шлаков 15,5—17,5 МПа, из пылевидных зол 9—10,5 МПа, сульфатосодержащих 21,5 МПа и для шлакопортландцемента 25,5 МПа. Для отвального мартеновского шлака прочность была не более 6,1 МПа. С повышением температуры до 115°С прочность возросла для всех вяжущих на 20—30%. При повышении температуры до 128°С прочность шлакозольных вяжущих увеличивается незначительно (исключение составляет мартеновский шлак), а при достижении 158°С прирост прочности против пропаривания составляет 50—80%. При 175°С прочность при сжатии находится в пределах 31,3 МПа для доменных гранулированных шлаков; 35,5 МПа для мартеновского закристаллизованного и 20—25 МПа для сверхкислых шлаков и зол.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что удовлетворительные результаты по прочности могут быть получены при пропаривании шлакозольных вяжущих при 90—95°С и при запаривании при температуре 175°С.

Сокращения сроков твердения шлакозольных вяжущих при одновременном увеличении их прочности можно достигнуть затворением горячей водой (90—80°С) с последующим виброперемешиванием, а также введением ускорителей твердения ( $\text{CaCl}_2$ ). В этом случае прочность при сжатии возрастает на 15—25%.

На увеличение прочностных характеристик в основном пропаренных шлакозольных вяжущих оказывает существенное влияние следепропарочное твердение (в срок до 7, 28 сут). Это явление обусловливается увеличением количества цементирующего вещества за счет продолжающейся гидратации и гидролиза шлакового стекла в присутствии активаторов твердения — извести, гипса или портландцемента. Дальнейшее выдерживание образцов при нормальной температуре более 28 сут мало влияет на прочность и фазовый состав затвердевших вяжущих.

Увеличение прочности зависит от вида шлака, количества активаторов, дисперсности вяжущих. Наибольший прирост следепропарочной прочности (до 50—60%) обнаруживают вяжущие из высококальциевых

Т а б л и ц а 4. Влияние технологических факторов, условий режимов шлаковых и зольных вяжущих

Вид сырья и состав вяжущего	Предел прочности при сжатии, МПа					
	пропаривание при температуре, °С			автоклавная обработка при температуре, °С		
	80	95	115	123	143	153
1	2	3	4	5	6	7
Доменный гранулированный шлак Тульского завода — шлак 85 : известь 10 : гипс 5	16	21,5	25,9	26,9	28,5	31,3
Мартеновский отвалный шлак завода «Серп и молот» — шлак 90 : известь 10	6,1	6	11	18,9	27	35,5
Топливный гранулированный шлак московской ТЭЦ-11 — шлак 75 : известь 20 : гипс 5	10,5	15,5	17	18,5	19	22
Пылевидная зола московской ТЭЦ-11 — зола 60 : известь 35 : гипс 5	5,3	9	12,8	14	18,3	20
Пылевидная зола Назаровской ГРЭС — зола 80 : известь 15 : гипс 5	6,7	10,5	14,5	16	19,1	23
Шлакопортландцемент на топливных гранулированных шлаках — шлак 55 : портландцемент 40 : гипс 5	18,9	22,3	27,8	28,5	34,9	37,1

твердения на прочностные характеристики

Формование из смесей при температуре 80°						Формование с добавкой 2% CaCl <sub>2</sub>					
пропаривание при температуре 95° С 2+10+2 ч			запаривание при температуре 175° С, 2+8+2 ч			пропаривание при температуре 95° С, 2+10+2 ч			запаривание при температуре 175° С, 2+8+2 ч		
прочность, МПа		усадка, мм/м	прочность, МПа		усадка, мм/м	прочность, МПа		усадка, мм/м	прочность, МПа		усадка, мм/м
сжатие	изгиб		сжатие	изгиб		сжатие	изгиб		сжатие	изгиб	
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
23,3	7,1	0,65	32	9,5	0,5	26,1	8,3	0,71	33,8	9,4	0,63
6,5	1,8	0,91	36,1	11,1	0,48	7,5	2,1	0,75	37,5	11,5	0,65
16,8	4,4	0,71	23,3	7,5	0,62	18,3	5,5	0,95	25,1	7,8	0,79
11	2,9	1,59	21	6,2	1,1	12,6	3,2	1,75	23,1	6,8	0,91
13,6	3,2	1,35	24,8	8,3	1	15	3,8	1,55	25,9	8,5	0,87
26,4	8,3	0,61	35	9	0,48	28,5	9,3	0,73	37,5	9,7	0,62

Т а б л и ц а 5. Изменение прочности и усадочных деформаций пропа  
длительном хранении в различных средах

Составы вяжущих	Хранение на воздухе при относительной влажности 60%					
	Срок хране					
	1		6		12	
	прочность при сжа- тии, МПа	усадка, мм/м	прочность при сжа- тии, МПа	усадка, мм/м	прочность при сжа- тии, МПа	усадка, мм/м
1	2	3	4	5	6	7
<b>Доменные гранули</b>						
Ждановского завода — шлак 85 : известь 10 : : гипс 5	21	0,35	22,1	0,53	21,5	0,61
Новокузнецкого за- вода шлак 85 : известь 10 : гипс 5	25,5	0,37	24,4	0,55	25,9	0,62
Челябинского заво- да — шлак 85 : известь 10 : гипс 5	19,6	0,37	19,4	0,54	20,8	0,63
<b>Топливные гранули</b>						
Мироновской ГРЭС — шлак 80 : известь 15 : : гипс 5	17	0,52	16,5	0,76	17,4	0,89
Красноярской ТЭЦ-2 — шлак 85 : известь 10 : : гипс 5	18,3	0,41	18,9	0,53	19	0,64
<b>Пылевид</b>						
Мироновской ГРЭС — зола 60 : известь 35 : : гипс 5	12	1,45	9,5	2,3	9,7	2,52
Красноярской ТЭЦ — зола 75 : известь 20 : : гипс 5	12,3	1,25	10,5	1,91	10,9	2
Шлакопортландцемент на топливном гранулиро- ванном шлаке — шлак 55 : портландцемент 40 : : гипс 5	27,5	0,38	28,8	0,55	29,7	0,66

Примечание. Параривание образцов при 90°С по

ранных шлакозольных вяжущих при

Хранение в воде						Обработка 100%-ным углекислым газом		
ния, мес						Срок хранения, сут		
1		6		12		3	7	28
прочность при сжатии, МПа	набухание, мм/м	прочность при сжатии, МПа	набухание, мм/м	прочность при сжатии, МПа	набухание, мм/м	прочность при сжатии, МПа		
8	9	10	11	12	13	14	15	16

рованные шлаки

21,8	0,22	24	0,39	24,6	0,4	24,8	24	21,5
27	0,24	29,4	0,35	29,1	0,386	26,7	25,8	24,5
20,3	0,25	22,8	0,38	22,9	0,415	23,1	22	19,8

рованные шлаки

17,9	0,45	18,5	0,68	18	0,71	13	13,4	11
19,5	0,3	21,8	0,42	21,7	0,49	19,7	18,7	18,1

ные золы

12,5	1,05	13,8	2	14,2	2,15	7,1	6,8	6
12	0,95	14,4	1,64	15,5	1,79	12,8	12,5	12,1
29	0,29	29	0,4	31,5	0,58	29,3	28,5	27

режиму 2+10+2 ч.



Таблица 6. Изменение прочностных и усадочных деформаций  
длительном хранении на воздухе, в воде,

Состав вяжущего	Хранение на воздухе при относительной влажности 60%					
	Сроки хранения					
	1		6		12	
	прочность при сжатии, МПа	усадка, мм/м	прочность при сжатии, МПа	усадка, мм/м	прочность при сжатии, МПа	усадка, мм/м
1	2	3	4	5	6	7
Доменные гранулы						
Ждановского завода — шлак 85 : известь 10 : : гипс 5	37,1	0,3	36,8	0,36	37,3	0,47
Новокузнецкого за- вода — шлак 85 : известь 10 : гипс 5	36,7	0,28	37	0,31	37,5	0,48
Челябинского заво- да — шлак 85 : известь 10 : гипс 5	32	0,3	33,1	0,35	33	0,42
Топливные гранулы						
Мироновской ГРЭС — шлак 80 : известь 15 : : гипс 5	21,5	0,46	22,5	0,55	21,8	0,65
Красноярской ТЭЦ — шлак 85 : известь 10 : : гипс 5	25,9	0,43	26	0,53	26,5	0,61
Пылевид						
Мироновской ГРЭС — зола 60 : известь 35 : : гипс 5	24,9	0,91	23,8	1,45	23,5	1,71
Красноярской ТЭЦ — зола 85 : известь 10 : : гипс 5	25,4	0,75	24,2	1,16	24	1,35
Шлакопортландцемент на топливном гранулиро- ванном шлаке — шлак 55 : портландцемент 40 : : гипс 5	28,3	0,31	29,8	0,35	29,8	0,49

Примечание. Запаривание образцов при 175°С по

запаренных шлакозольных вяжущих при  
в среде 100%-ного углекислого газа

Хранение в воде						Обработка 100%-ным углекислым газом		
ния, мес						Срок хранения, сут		
1		6		12		3	7	28
прочность при сжатии, МПа	набухание, мм/м	прочность при сжатии, МПа	набухание, мм/м	прочность при сжатии, МПа	набухание, мм/м	прочность при сжатии, МПа		
8	9	10	11	12	13	14	15	16

рованные шлаки

36,1	0,26	38,9	0,37	38	0,39	37	38,6	35,8
35,9	0,26	38,1	0,35	37,8	0,4	36,8	37,9	36
31,5	0,28	34,9	0,33	34,5	0,38	32	34,5	32,5

рованные шлаки

20,5	0,41	23,8	0,5	22,6	0,6	21	21,8	21,5
24,8	0,39	27,5	0,49	26,9	0,53	25,5	26,8	25,9

ные золы

25,2	0,43	26,7	0,7	26,5	0,78	20,5	21,9	29,1
26,8	0,49	27,5	0,75	27	0,82	24,8	26,2	23,5
28,5	0,29	31,5	0,4	31	0,41	28	27,3	27,1

режиму 4+8+3 ч.

шлаков, сульфатосодержащих зол и шлакопортландцемент на топливных гранулированных шлаках.

Для определения стойкости шлакозольных вяжущих во времени были изучены изменения их прочностных и деформативных свойств в возрасте от 1, 6, 12, 24 и более месяцев при нахождении растворных образцов состава 1:3 (по массе) в воде, на воздухе и в 100%-ной углекислоте (табл. 5 и 6).

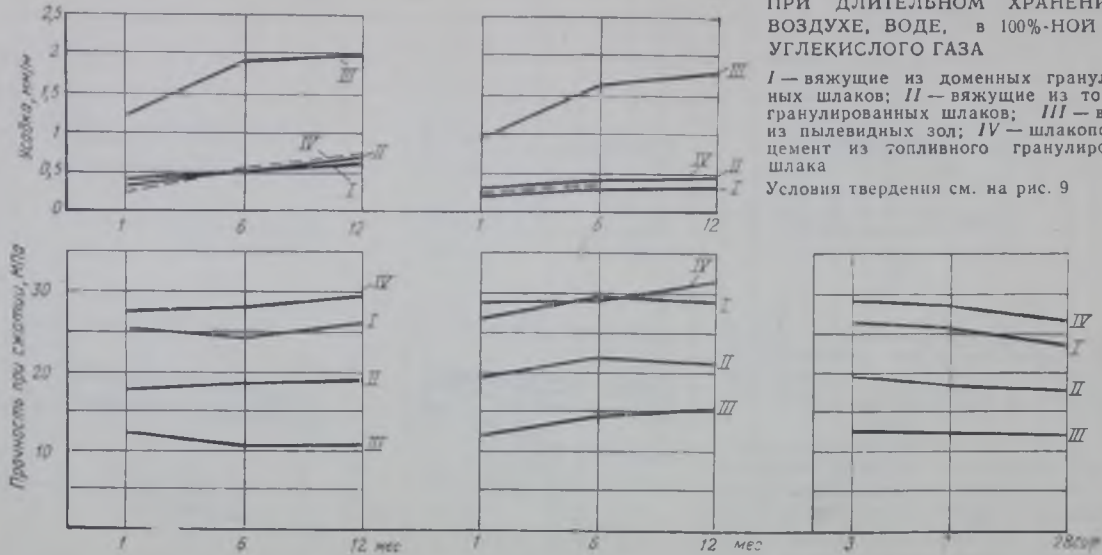
Результаты исследований показали, что чем выше соотношение между окисью кальция и кислотными окислами в шлакозольных вяжущих, тем они оказываются более стойкими во времени. Кроме того, на повышение стойкости вяжущих из сверхкислых шлаков и зол оказывает положительное влияние запаривание вяжущих или пропаривание их с добавкой портландцемента до 10—15%.

Такое явление обуславливается изменениями в фазовом составе продуктов гидратации вяжущих и в структуре новообразований, приобретающих более выраженное кристаллическое строение по сравнению с тем, которое они имеют при твердении при обычной температуре.

Результаты опытов, представленные в табл. 5, свидетельствуют о достаточной устойчивости шлаковых и зольных вяжущих оптимальных составов во времени при нахождении их в различных средах. Необходимо отметить, что пропаренные образцы, изготовленные на шлаках и золах с повышенным содержанием СаО, обнаружили склонность к повышению прочности через 3—6 мес при нахождении их в воде на 15—20%, на воздухе на 10—15% и через 3 сут в среде 100%-ного углекислого газа на 20—25% (рис. 8).

Через 7 и 28 сут прочность закарбонизированных образцов снизилась до исходных значений. Запаренные образцы характеризовались пониженными значениями приращения прочности во времени, всего до 8—12%. Подобное обстоятельство, вероятно, можно объяснить более активными процессами гидролиза и гидратации вяжущих, протекающих при запаривании их в автоклаве при повышенных температурах (до 175°С и более), предопределяющими формирование цементирующего вещества с повышенной конечной прочностью. Полнота протекающего процесса взаимодействия сырьевых компонентов вяжущих снижает возможности их дальнейшего

РИС. 8. ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И  
УСАДОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРОПА-  
РЕННЫХ ШЛАКОЗОЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ  
ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ НА  
ВОЗДУХЕ, ВОДЕ, в 100%-НОЙ СРЕДЕ  
УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА



I — вяжущие из доменных гранулированных шлаков; II — вяжущие из топливных гранулированных шлаков; III — вяжущие из пылевидных зол; IV — шлакопортландцемент из топливного гранулированного шлака

Условия твердения см. на рис. 9

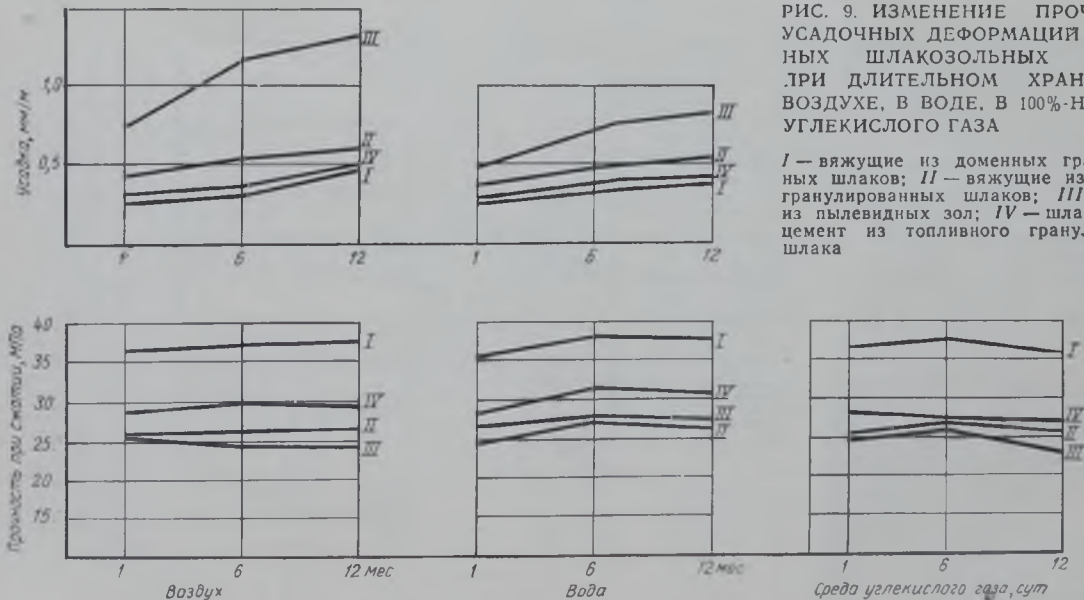


РИС. 9. ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И УСАДОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗАПАРЕННЫХ ШЛАКОЗОЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ НА ВОЗДУХЕ, В ВОДЕ, В 100%-НОЙ СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

*I* — вяжущие из доменных гранулированных шлаков; *II* — вяжущие из топливных гранулированных шлаков; *III* — вяжущие из пылевидных зол; *IV* — шлакопортландцемент из топливного гранулированного шлака

упрочнения (табл. 6, рис. 9). В то же время в условиях пропаривания при 90—95°С химическая энергия стеклофазы сырьевых материалов остается недоиспользованной, что создает предпосылки к послепропарочному ее взаимодействию (при определенных условиях) с гидроксидом кальция и гипсом, обеспечивающему более интенсивный прирост прочности, чем после запаривания.

При воздействии углекислого газа происходят глубокие изменения в химико-минералогическом составе затвердевших шлакозольных вяжущих.

Из полученных данных следует, что прочность образцов, содержащих несвязанный гидрат окиси кальция в количестве до 2—4%, в первые сутки повысилась на 15—20% и через 28 сут карбонизации составила 110—115% прочности исходных образцов-близнецов. Прочность закарбонизированных пропаренных образцов, изготовленных из сверхкислых шлаков, через 28 сут снизилась на 10—15%, а для образцов из пылевидных зол снижение прочности составило 25—40%. Те же образцы, но запаренные в автоклаве оказались более стойкими, хотя карбонизация также снижает их прочность на 5—10% для шлаковых вяжущих и на 15—20% для зольных вяжущих.

Прочностные характеристики вяжущих веществ и их долговечность тесно связаны с деформациями материала. Усадка и набухание определялись на пропаренных и запаренных растворных образцах состава 1:3 размером 4×4×16 см, хранившихся на воздухе и в воде в течение 1, 6, 12 мес. Образцы из доменных гранулированных шлаков при нахождении в воздушной среде в течение 12 мес показали усадку после пропаривания 0,61—0,63 мм/м и запаривания 0,42—0,47 мм/м.

Для пропаренных образцов из топливных гранулированных шлаков московской ТЭЦ-11 усадка составила 0,89, Красноярской ТЭЦ-2 — 0,64 мм/м и после запаривания 0,65—0,61 мм/м. Образцы из пылевидных зол характеризовались повышенными усадочными деформациями и их величины находились в пределах 2—2,52 и 1,35—1,71 мм/м. При этих измерениях влажность образцов изменялась с 7,5—8,8 до 1,9—2,6%.

Усадочные деформации шлакозольных вяжущих относительно близки к соответствующим показателям цементных образцов. Стабилизация усадок практически наступает к 4—6 мес для пропаренных образцов и к 3—5 мес для запаренных. Величина набухания, как прави-

ло, для шлакозольных вяжущих достигает максимума через 3—4 мес и на 70—80% по абсолютным значениям ниже усадочных деформаций.

Специальному изучению были подвергнуты шлакопортландцементы, изготовленные из основных гранулированных шлаков фосфорного производства, сверхкислых гранулированных шлаков цветной металлургии и энергетической промышленности.

В настоящее время при производстве шлакопортландцемента у нас и за рубежом используются только основные и слабокислые доменные шлаки. Содержание шлаков в цементе в зависимости от их химического состава и области применения цемента находится в пределах 30—60%.

Как показали наши исследования, шлакопортландцементы, полученные на новом сырье, обладают надлежащей прочностью, пониженной экзотермией при твердении и повышенной сульфато- и температуростойкостью.

Учитывая возможность расширения сырьевой базы для производства шлакопортландцемента и получения впервые ячеистого бетона на его основе, автор изучил прочностные и деформативные свойства новых цементов.

С этой целью исследовалось три вида топливных гранулированных шлаков от сжигания углей Донецкого бассейна, Печорского месторождения с содержанием  $\text{CaO} + \text{MgO}$  2—4% и Канско-Ачинского бассейна (табл. 7), где  $\text{CaO} + \text{MgO}$  содержится до 25—35%, а также сверхкислый никелевый шлак и основной фосфшлак. Применяли клинкер Себряковского, Воскресенского и Красноярского цементных заводов, с содержанием  $\text{C}_3\text{S}$  от 57 до 45% и  $\text{C}_3\text{A}$  от 5 до 12%.

Клинкеры и шлаки с 3—5% гипса размалывали совместно и отдельно в шаровой мельнице до остатка на сите 0085 6—8%, что соответствовало удельной поверхности в 3000—3500  $\text{см}^2/\text{г}$  (по Товарову).

Твердение образцов по режиму из растворов пластичной консистенции состава 1:3, осуществлялось в нормальных условиях в течение 28 сут при пропаривании по режиму 2+10+2 ч и температуре 90—95°С и при запаривании при температуре 175°С по режиму 2+8+2 ч.

Испытания портландцементов с добавками шлаков при совместном помоле (табл. 7) показали, что все цементы с добавками 15% шлака несколько увеличивают прочность при сжатии после 7 и 28 сут твердения, а с

Таблица 7. Физико-механические свойства шлакопортландцементов

Виды и составы шлакопортланд- цемента	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Водопоглощение теста нормальной густоты, %	Сроки схватывания, ч—мин		Удельное тепловыделение, кал/г	Прочность при сжатии, МПа	
				начало	конец		после 28 сут <sup>1</sup>	после пропаривания
Себряковский клинкер : шлак Мироновской ГЭС : гипс (60 : 40 : 5)	1150	3	25	2—40	6—50	35	$\frac{19}{27,5}$	20
Себряковский клинкер : шлак Красноярской ТЭЦ : гипс (60 : 40 : 5)	1020	3,11	27	2—10	6—30	49	$\frac{21}{31}$	23,5
Красноярский клинкер : шлак никелевый : гипс (60 : 40 : 5)	1110	3,1	27	2—30	6—10	37	$\frac{18}{23,5}$	19
Красноярский клинкер : фосфошлак : гипс (60 : 40 : 5)	1020	3,15	27	2—00	5—30	45	$\frac{23}{35,5}$	23,5

<sup>1</sup> Над чертой — пластичные, под чертой — трамбованные.

20—30% шлака снижают прочностные характеристики на 10—15%. При твердении в тепловлажных условиях прочность шлакопортландцемента возрастает на 15—25% по сравнению с портландцементом.

Добавка 40 и 50% шлака понижает прочность при сжатии при нормальном твердении на 20—25% для клинкеров Себряковского и Красноярского заводов и до 50% для клинкера Воскресенского завода. При пропаривании прочность снизилась на 10—15%, а при запаривании снижение прочности не наблюдалось.

Следует отметить, что повышенная активность цемента отмечается у шлакопортландцементов, изготовленных на клинкерах с высоким содержанием  $C_3S$  и на шлаках Красноярской ТЭЦ и Назаровской ГРЭС. Таким образом, с добавкой сверхкислых шлаков в количестве 40—50% можно получить шлакопортландцемент



с прочностью при сжатии 20—25 МПа на растворных образцах через 28 сут нормального твердения или после пропаривания. После запаривания прочностные характеристики указанных цементов находятся в пределах 25—30 МПа. С введением шлака до 80% прочность при сжатии в нормальных условиях твердения снижается до 10 МПа, после пропаривания — до 15 МПа и запаривания — до 24 МПа.

Оптимальное содержание гипса зависит от количества вводимого шлака и при 40—50% шлаковой добавки составляет 5% к общей массе шлакопортландцемента.

При двухстадийном помоле портландцемента и гранулированного шлака прочностные характеристики увеличиваются на 25—30%.

При раздельном помоле клинкера с гипсом и шлаком до удельной поверхности 3000—3500 см<sup>2</sup>/г прочность шлакопортландцемента всех составов увеличивается на 20—30% по сравнению с совместным помолом.

Это объясняется пониженной размалываемостью сверхкислых шлаков и невозможностью регулирования дисперсностью компонентов при совместном помоле за счет избирательного измельчения более мягкого материала — клинкера.

Проведенные петрографические анализы исходных цементных порошков позволили установить, что шлак при совместном помоле концентрируется в основном в грубой фракции с размером частиц до 150—200 мкм, с преобладанием фракции от 35 до 65 мкм.

Измельченный клинкер сосредоточен в тонкой фракции с размером частиц менее 30 мкм. В то же время отмечается повышенное содержание отдельных агрегатов клинкерных минералов алюмоферритной фазы с поперечными сечениями до 100 мкм.

При исследовании шлакопортландцемента двухстадийного помола установлено, что отдельные частицы шлакового стекла имеют размеры до 150—200 мкм с преобладанием фракции в 25—40 мкм. Частицы цемента имеют размеры не более 15—20 мкм, и агрегаты почти отсутствуют. При раздельном помоле до удельной поверхности 3000—3500 см<sup>2</sup>/г установлено, что частицы шлакового стекла имеют размеры до 60—80 мкм с преобладанием фракции в 20—30 мкм и размер частицы цемента находится в пределах 30—65 мкм. Таким обра-

зом, при совместном и двухстадийном помоле за счет абразивных свойств сверхкислого шлака значительно повышается степень измельчения клинкерных минералов, а шлак сосредотачивается в грубых фракциях.

При раздельном помоле создаются предпосылки получать цементный порошок, состоящий в основном из мелких фракций шлака и клинкера, которые способствуют повышенной реакционной способности, предопределяющей увеличение прочностных характеристик затвердевшего образца. Для определения оптимальной реакционной способности шлакопортландцемента необходимо, в зависимости от свойств применяемого шлака и клинкера, определять размеры и соотношения фракций с учетом водопотребности получаемых цементов и линейных деформаций затвердевших образцов.

Физико-химические процессы твердения предопределяют и технические свойства цементного камня — его прочность, деформативные характеристики, стойкость в различных средах и во времени.

Основные физико-механические свойства шлакопортландцемента на основе сверхкислых шлаков и фосфошлаков представлены в табл. 7.

Результаты этих исследований позволяют констатировать, что цемент с 30—40% гранулированного шлака незначительно отличается от свойств клинкерных цементов и шлакопортландцементов, полученных из доменных гранулированных шлаков повышенной основности.

Деформативные изменения (объемные, линейные, трещинообразование) затвердевшего цементного камня, изготовленного из цемента с добавкой указанных шлаков в количестве 15, 30, 40, 60 и 80%, определялись по комплексной методике на образцах-балочках, приборе Ле Шателье и на кольцах Лермита.

Сравнительные результаты трех способов исследований деформативных изменений показали, что эти изменения зависят от вида применяемого клинкера, тонкости помола исходных компонентов и условий твердения цемента. Усадка цементов с добавками 40% гранулированного шлака при тонкости помола 3000 см<sup>2</sup>/г при нормальном твердении через 3 мес хранения на воздухе составила 0,56—0,69 мм/м. При этом большее значение усадочных деформаций относится к цементам, изготовленным на клинкере с содержанием С<sub>3</sub>А более 10%. Пропаренные растворные образцы в 3-месячном возрасте

имели усадку 0,6—0,62 мм/м и запаренные 0,23—0,28 мм/м. Необходимо также отметить, что наибольшую усадку показали цементы с добавками шлаков Мироновской ГРЭС ( $\text{CaO} + \text{MgO}$  до 3%). Это объясняется несколько пониженной активностью шлака, предопределяющего замедленную гидратацию при большей потере воды. При увеличении дисперсности шлака (при раздельном помоле) повышение усадочных деформаций не наблюдалось. Однако с увеличением тонкости помола цемента до удельной поверхности 4000—5000  $\text{см}^2/\text{г}$  на образцах-кольцах, твердевших во влажных условиях в течение 28 сут и в пропарочной камере, отмечалось появление глубоких трещин на боковых поверхностях. При этом величина усадочных деформаций остается в прежних пределах, т. е. не превышает 0,5—0,6 мм/м. По-видимому, при назначении тонкости помола исходных компонентов и условий твердения необходимо контролировать скорость и степень гидратации цементов, влияющих на технические свойства затвердевшего цементного камня. Исследования также показали, что при введении добавки шлака до 70—80% в первые сроки твердения наблюдается некоторое уменьшение в объеме за счет замедленной гидратации при отслаивании и удалении воды. При содержании шлака до 40% изменений в объеме в процессе схватывания и твердения не отмечалось.

Стойкость цементного камня шлакопортландцемента во времени и в различных условиях хранения определялась изменениями прочностных характеристик и линейных деформаций растворных образцов состава 1 : 3.

Все образцы, независимо от условий твердения, обладают прочностью при выдерживании их на воздухе в течение 6 мес от 20 до 30 МПа, в воде от 19 до 25 МПа. Усадка образцов при хранении их на воздухе в течение 6 мес составила 0,65—0,79 мм/м; величина набухания при хранении в воде находилась в пределах 0,6—0,65 мм/м. При замораживании и оттаивании после 50 циклов набухание образцов было в пределах 0,4 и 0,5 мм/м для пропаренных и 0,7—0,8 мм/м для запаренных. Указанные значения прочностных характеристик и линейных деформаций соответствуют показателям для образцов, изготовленных из клинкерных цементов и из нового шлакопортландцемента.

Кроме определений общих строительных свойств вяжущих веществ были исследованы тепловыделения це-

ментов при гидратации, стойкость их в пресных и сульфатных водах.

Теплота гидратации шлакопортландцемента состава 60:40:5 на основе сверхкислых шлаков характеризуется тепловыделением до 45—50 кал/г.

Цемент с добавкой до 40% сверхкислого шлака обладает стойкостью в пресных и сульфатных водах, которая характеризуется постоянством прочностных характеристик (20—25 МПа) в течение 6 мес.

Анализ опубликованных исследований и результаты наших работ свидетельствуют о расширении возможностей получения как бесклинкерных и малоклинкерных вяжущих, так и шлакопортландцементов, содержащих

Т а б л и ц а 8. Оптимальные составы шлакозольных вяжущих

Виды шлаков и зол	Ориентировочное содержание по массе, %			Марка вяжущих	
	шлак, зола	известка негашеная	двуводный гипс	при пропаривании или электропрогреве 95—98° С	при запаривании при температуре 175° С
Гранулированные шлаки					
Высококальциевые (СаО >45%) доменные, электрофосфорные	85	10	5	200—250	300—400
	80	15 (портландцемент)	5	150—200	300—400
Среднекальциевые (СаО от 45% до 20%) доменные, маргеновские, топливные	80	15	5	150—200	250—350
	65—55	30—40 (портландцемент)	5	200—300	300—400
Низкокальциевые (СаО от 20 до 10%) ваграночные, топливные	75	20	5	100—150	250—300
	65—55	30—40 (портландцемент)	5	200—300	300—400
Сверхкислые (СаО <10%) шлаки цветной металлургии, топливные	75	20	5	100—150	150—250
	65—55	30—40 (портландцемент)	5	200—300	300—400
Пылевидные золы					
Высококальциевые (СаО >20%)	80	15	5	150	200—250
	55	40 (портландцемент)	5	150—200	250—350
Сверхкислые (СаО <10%)	60	35	5	100	200—250
	55	40 (портландцемент)	5	100—150	250

побочные продукты (шлаки и золы) различных отраслей промышленности — металлургической, энергетической, химической и т. п.

Оптимальные составы шлакозольных вяжущих, полученных при использовании шлаков и зол в соответствии с принятой классификацией по содержанию  $\text{CaO} + \text{MgO}$ , представлены в табл. 8. Изменяя количественное содержание активизаторов твердения — извести, гипса, портландцемента, а также условия твердения, можно получать вяжущие марок 100, 150, 200, 250 и 300.

Производство шлаковых и зольных вяжущих может осуществляться на дробильно-помольной установке включающей процессы дробления, сушки шлаков или зол, дозирования основного сырья и активизаторов твердения и помол в многокамерной шаровой мельнице. Производительность такой установки определяется потребностью в вяжущем и дает 100, 200, 300 тыс. т шлакозольного вяжущего в год при себестоимости за тонну от 6 до 4 руб.

Использование шлакозольных вяжущих, а также шлаков и зол в качестве тонкодисперсного заполнителя в производстве ячеистобетонных изделий будет способствовать расширению дешевой сырьевой базы и получению изделий с пониженной себестоимостью при надлежащем качестве.

## ГЛАВА II. ПОЛУЧЕНИЕ ШЛАКОЗОЛЬНЫХ БЕТОНОВ С ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

Строительно-деформативные свойства ячеистобетонных изделий зависят от вида и качества применяемых сырьевых материалов и их подготовки, составов бетона, водовяжущего отношения, вида, качества и расхода газообразователя, температуры воды затворения и вспучиваемых ячеистых масс, добавок, способов и длительности перемешивания смесей, условий формирования пористой структуры бетона, а также зависят от вида и режима тепловлажностной обработки отформованных изделий. При обобщении влияния технологических факторов на производство ячеистобетонных изделий можно выделить 3 этапа: I — подготовка сырьевых материалов; II — формирование ячеистой структуры; III — твердение изделий из ячеистого бетона. Такое деление процесса изго-

товления ячеистобетонных изделий позволяет выявлять влияние отдельных технологических параметров на технические свойства бетона и качество изделий.

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКА И ПОДГОТОВКА СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

С целью исследования возможности получения ячеистого бетона из промышленных отходов были выбраны 6 видов гранулированных шлаков доменного производства, 2 вида гранулированных шлаков цветной металлургии, 5 видов гранулированных топливных шлаков и 7 пылевидных зол электростанций, которые являются наиболее типичными и распространенными среди побочных продуктов металлургической и энергетической промышленности Советского Союза (см. табл. 1). Кроме того, для сравнения и с целью расширения сырьевой базы были опробованы закристаллизованные (отвальные) шлаки мартеновского и ваграночного производства. Были исследованы также новые сырьевые материалы — гранулированные шлаки электротермического производства фосфора и сульфатосодержащие угольные золы.

По содержанию основных и кислотных окислов шлаки и золы представлены в широком диапазоне — от высококальциевых до сверхкислых. Для изготовления вяжущих в первую очередь использовались шлаки и золы высоко- и среднекальциевые (содержание  $\text{CaO} + \text{MgO}$  более 45% и не менее 20%), проявляющие повышенную гидравлическую активность в условиях сульфатно-щелочной среды при тепловой обработке. Низкокальциевые (кислые) и сверхкислые шлаки и золы применяли в качестве активных тонкодисперсных заполнителей. В случае использования этих сырьевых материалов для производства вяжущих, с целью обеспечения повышенной прочности и долговечности, в состав газобетона вводили портландцемент в количестве 50—75 кг на  $1 \text{ м}^3$  бетона или применяли термообработку в автоклаве при повышенной температуре до  $175^\circ \text{C}$  и более.

Содержание стекла в гранулированных шлаках находилось в пределах от 98 до 70%. Максимальное содержание стеклофазы наблюдалось в шлаках мокрой грануляции. При рассмотрении доменного гранулированного шлака и шлака фосфорного производства под микроскопом в поляризованном свете среди прозрачного изотроп-

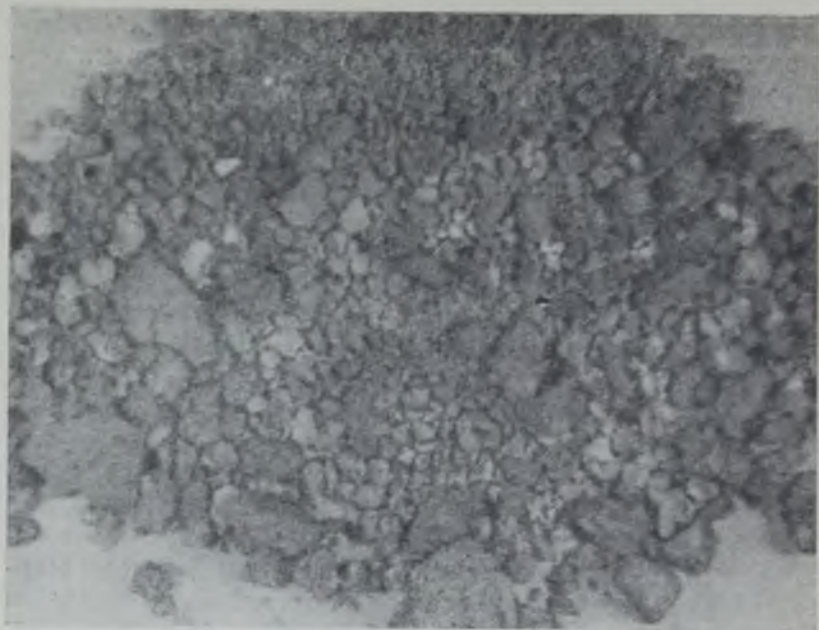


РИС. 10. ТОПЛИВНЫЙ ГРАНУЛИРОВАННЫЙ ШЛАК МИРОНОВСКОГО ГРЭС

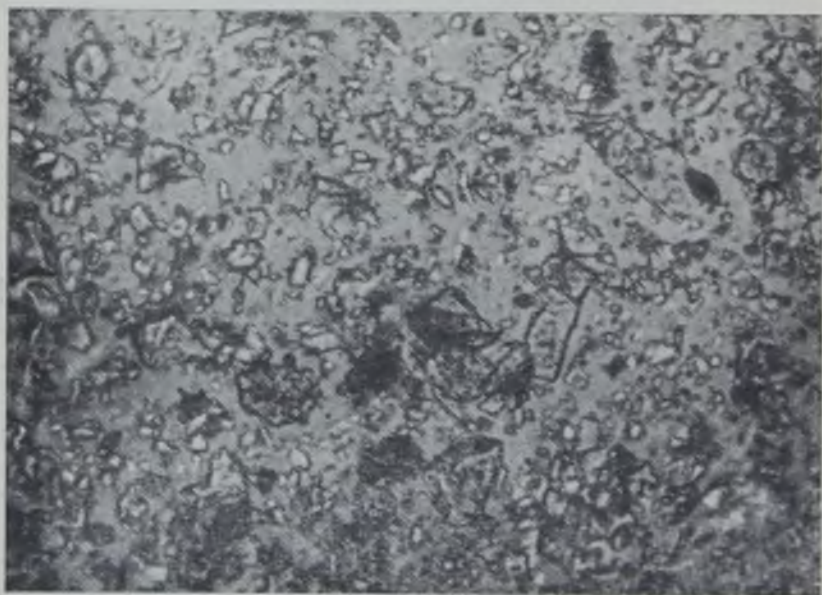


РИС. 11. МОЛОТЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ГРАНУЛИРОВАННЫЙ ШЛАК. ПРОХОДЯЩИЙ СВЕТ, НИКОЛИ 11,  $\times 100$

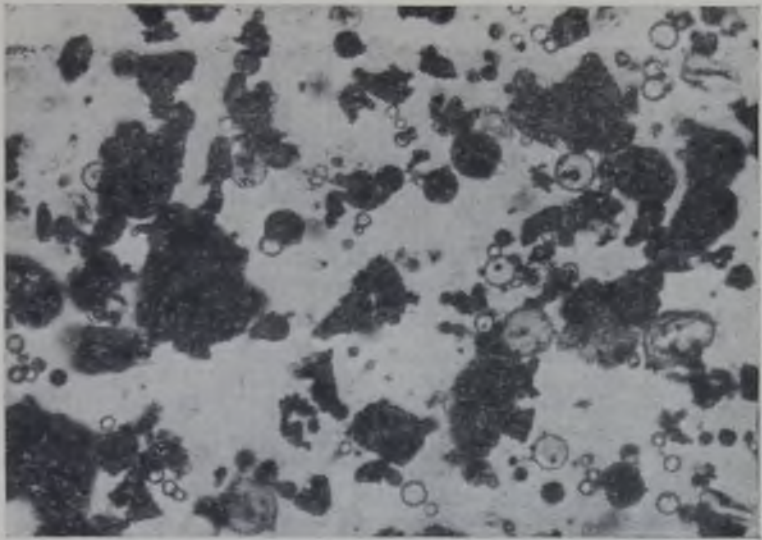


РИС. 12. ПЫЛЕВИДНАЯ ЗОЛА (СВЕРХКИСЛАЯ) МОСКОВСКОЙ ТЭЦ-11. ПРОХОДЯЩИЙ СВЕТ, НИКОЛИ 11,  $\times 100$

ного стекла встречаются отдельные скелетные выделения в виде мелилита, псевдоволластонита и др., указывающие на зарождение кристаллической фазы в расплаве, но остановленное при быстром охлаждении. Снимки, полученные методом угольных реплик с помощью электронного микроскопа, свидетельствуют о тонкопористой пемзовидной структуре шлакового стекла. Пемзовидное строение стекла ярко выражено у высококальциевых гранулированных шлаков.

В гранулированных топливных шлаках и шлаках цветной металлургии преобладает стекло более плотного строения (рис. 10 и 11). Быстроохлажденные шлаки представляют собой зеленовато-черные плотные, но трещиноватые гранулы размером 10—15 мм. Форма их чаще всего округлая, но при растрескивании возникает мелкая фракция, состоящая из остроугольных частиц.

Используемые при изготовлении ячеистобетонных изделий низкокальциевые золы Ступинской, Дорогобужской, Кураховской, Московской и Иркутской ТЭЦ представляют собой продукт обжига глины с небольшим количеством кварцевого песка, соединениями железа или кальция. В пылевидных золах можно выделить три фазы:



стекловидную, кристаллическую и органическую. Изучение проб золы под микроскопом, а также данные термического анализа показали, что в золе преобладает стеклофаза до 70 — 80% в виде округлых и остроугольных частиц желтого, бурого, черного и бесцветного стекла с величинами преломления  $N=1,564$ ; 1,635 и 1,700 в зависимости от химического состава вещества (рис. 12). В золах присутствует также сильно муллитизированное глинистое вещество. Периферия этих частиц представлена алюмосиликатным стеклом, внутренняя часть — пористой аморфной массой (продуктом разрушения решетки глинистых минералов).

Благодаря наличию и заполнению газовой фазой пустот несгоревшего сажистого углерода частицы аморфизованного глинистого вещества окрашены в серо-черный цвет и непрозрачны. В количестве 10 — 15% наблюдается кристаллическая фаза в виде зерен кварца, полевых шпатов, отдельных минералов, вкрапленных в стеклофазу, и агрегатов скрытокристаллического кальцита, возникших за счет вторичной карбонизации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в процессе хранения золы.

Количественное соотношение между фазами характеризует потенциальную способность зол к гидратации. Так, с увеличением стекловидной фазы в золе повышается ее степень гидравлической активности при сульфатно-щелочной активизации. Содержание несгоревшего топлива в золах для каменных углей составляло от 10 до 15%, для бурых от 5 до 7%.

В пылевидных золах присутствуют агрегированные частицы различной степени однородности. Опасными являются агрегаты, образовавшиеся в результате контактного сплавления разнородных микрочастиц. Агрегированные шарообразные частицы с включениями микрокомпонентов более стабильны. Однако многофазовый состав пылевидных зол, и в том и в другом случае, предопределяет их неоднородность с развитой собственной пористостью, что оказывает существенное влияние на водопотребность и стабильность свойств изделий на их основе, прошедших водотепловую обработку.

Усреднить химический состав и физические свойства пылевидных зол можно механической обработкой, т. е. домолом их до площади удельной поверхности в 3000 — 3500 см<sup>2</sup>/г.

Основными физическими свойствами зол электростан-

Таблица 9. Свойства пылевидных зол, используемых в работе

Электростанция	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Водопогребность, %	Поглощение СаО, мг/г золы			Потери при прокаливании, %
					через 28 сут	после пропаривания при 95° С	после запаривания при 175° С	
Московская ТЭЦ-11	2.1	890	2850	55	47	120	210	12
Московская ТЭЦ-22	2.2	920	2500	54	47	110	200	10
Кураховская	2.1	850	2700	56	50	130	230	15
Дорогобужская	2	770	1800	56	48	115	190	8
Иркутская ТЭЦ	2	830	2200	57	42	110	200	5
Ступинская	2	700	2800	60	55	150	220	7
Назаровская ГРЭС	2.3	990	2300	58	—	30	50	7

ций являются: плотность, объемная масса, микропористость, дисперсность, водопотребность. Характеристики исследуемых зол представлены в табл. 9. Пылевидные золы указанных электростанций устойчивы против силикатного и железистого распада (ГОСТ 9358 — 62). По физическим свойствам и химическому составу исследуемые золы удовлетворяют требованиям, предъявляемым к сырью для производства ячеистых бетонов.

Высококальциевые пылевидные золы Назаровской ГРЭС и Красноярской ТЭЦ образуются при пылевидном сжигании углей Канско-Ачинского угольного бассейна, характеризующихся повышенным содержанием карбонатных пород в минеральной его части. Поэтому характерной особенностью таких зол является наличие значительного количества СаО+MgO до 20—35%, в том числе MgO до 4—6%.

До 10—15% основных окислов находится в свободном состоянии, что предопределяет самостоятельное твердение золы без изменения объема в случае отсутствия пережженных или остеклованных частиц СаО+MgO. Суммарное содержание кислотных окислов составляет 80—60%.

Рядовая зола включает в основном мелкозернистую слабо поляризирующую массу с различными показателями светопреломления от 1,59 до 1,68. Общее количество стекловидной фазы составляет 70—80% (рис. 13). Для

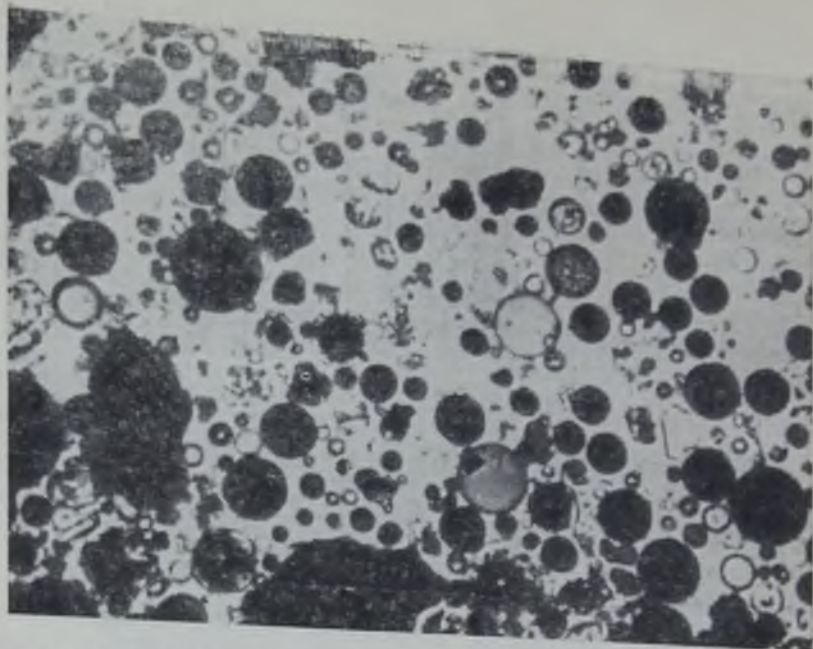


РИС. 13. РЯДОВАЯ ЗОЛА (ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВАЯ) КРАСНОЯРСКОЙ ТЭЦ. ПРОХОДЯЩИЙ СВЕТ, НИКОЛИ 11,  $\times 100$

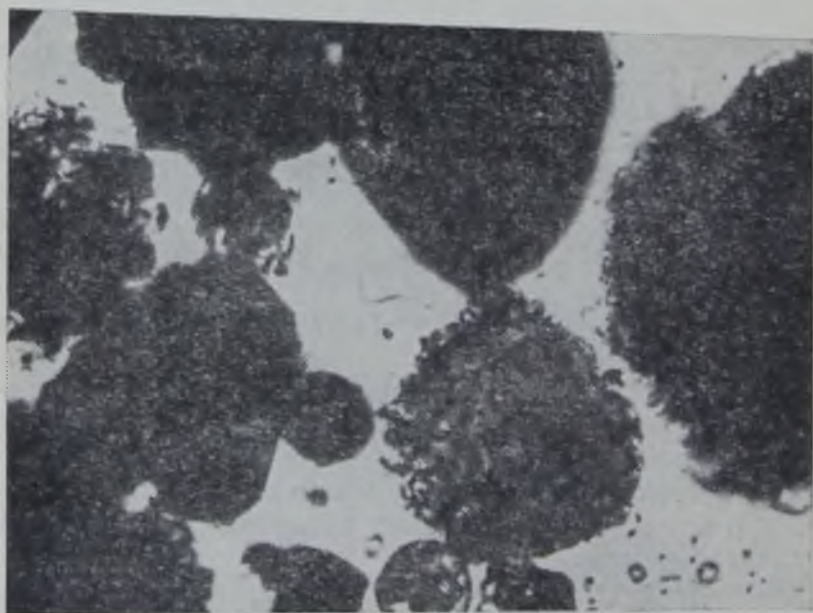


РИС. 14. ЗОЛА КРУПНОЙ ФРАКЦИИ, ОСТАТОК НА СИТЕ 0085. ПРОХОДЯЩИЙ СВЕТ, НИКОЛИ 11,  $\times 400$

высококальцевой золе характерно наличие капелек бесцветного и желтого стекла с небольшими включениями окиси кальция, игольчатых кристалликов муллита. Толщина стекловидной оболочки составляет от 2 до 10 мкм. В золе присутствуют оплавленные зерна кварца, полевого шпата, непрозрачные частицы аморфизированного обжигом глинистого вещества неправильной формы размером от 0,1 до 0,3 мм.

Состав рядовой золе значительно изменяется при ее фракционировании с помощью механического просеивания. Крупной фракцией золе является остаток в количестве 18—20% от общей массы на сите 0085, характеризующийся удельной поверхностью в 750—780 см<sup>2</sup>/г. В этой фракции отмечается пониженное содержание активных CaO+MgO, т. е. в пределах 15—20% от общего количества. Содержание стеклофазы не превышает 15—20%. Основная часть золе состоит из скрытокристаллических агрегатов (диаметром более 0,1—0,3 мм), включающих свободную окись кальция в пережженном состоянии с диаметром зерен до 50—60 мкм и кристаллики муллита. Отмечается также присутствие более крупных агрегатов кальцита, зерен кварца и частиц аморфизированного глинистого вещества (рис. 14).

Средняя фракция (остаток на сите 0063) характеризуется удельной поверхностью в 2500 см<sup>2</sup>/г и отличается от крупной увеличением содержания стеклофазы до 40%. Кроме того, в ней присутствуют до 30% скрытокристаллических агрегатов, представляющих собой продукты взаимодействия окиси кальция с глинистыми веществами, до 25—30% кварца и другие вещества (рис. 15).

В мелкой фракции, характеризующейся удельной поверхностью в 5100 см<sup>2</sup>/г, преобладают капельки стекла (до 90%) размером от 3 до 15 мкм, часть из которых прозрачна. В другой части капелек стекла наблюдаются закристаллизованные участки, состоящие из кристаллической фазы кварца, окиси кальция и магния, силикатов и алюмосиликатов кальция. Толщина стекловидной оболочки, изолирующей кристаллы CaO и MgO от внешней среды, составляет 1—5 мкм. Оплавленных зерен кварца и неправильной формы агрегатов содержится не более 5% (рис. 16).

Таким образом, как показали исследования, во всех фракциях отмечается присутствие кристаллов активных

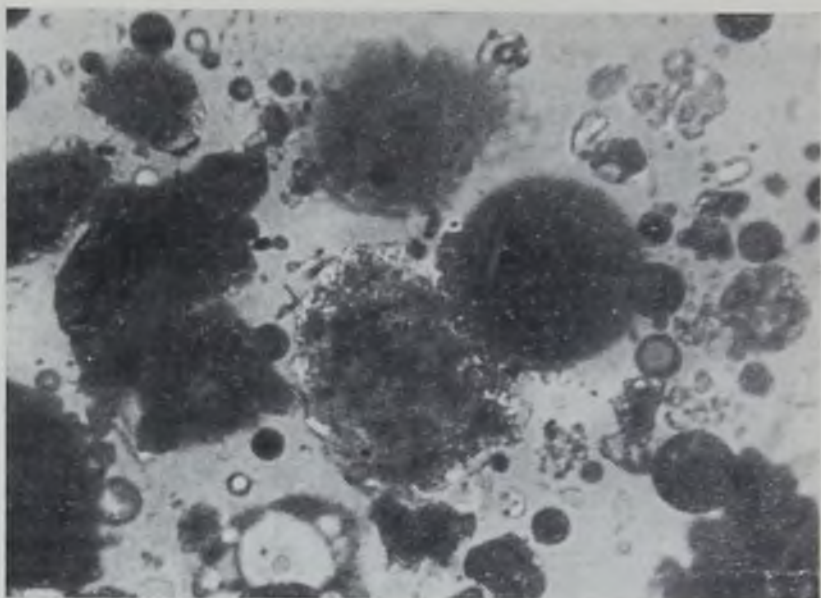


РИС. 15. ЗОЛА СРЕДНЕЙ ФРАКЦИИ, ОСТАТОК НА СИТЕ 0063. ПРОХОДЯЩИЙ СВЕТ, НИКОЛИ 11,  $\times 400$

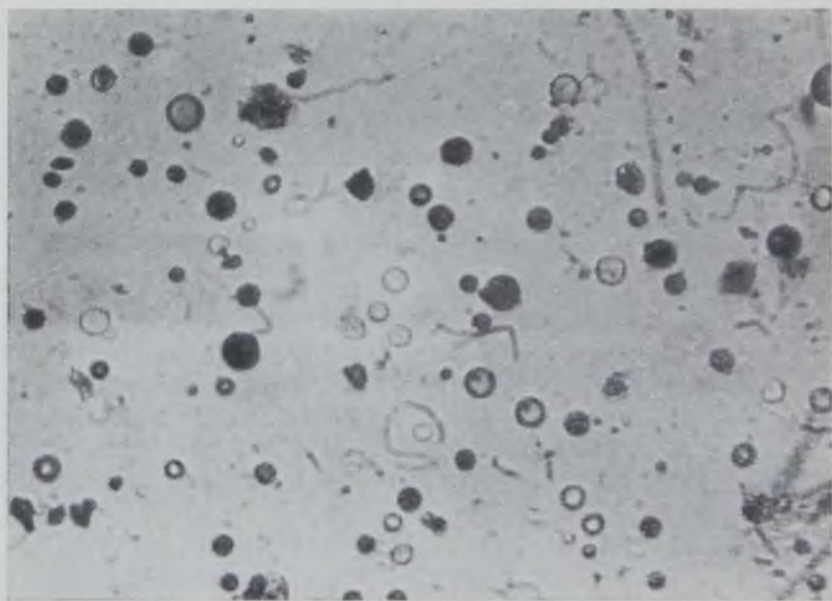


РИС. 16. ЗОЛА МЕЛКОЙ ФРАКЦИИ, ПРОШЛО ЧЕРЕЗ СИТО 0063. ПРОХОДЯЩИЙ СВЕТ, НИКОЛИ 11,  $\times 400$



РИС. 17. ПРОПАРЕННЫЕ И ЗАПАРЕННЫЕ ОБРАЗЦЫ ИЗ ТЕСТА НА ЗОЛЕ МЕЛКОЙ ФРАКЦИИ

$\text{CaO} + \text{MgO}$ , заключенных в стекловидную оболочку различной толщины. Чем крупнее фракция, тем толще стенки оболочки и замедленнее процессы гидратации активных  $\text{CaO} + \text{MgO}$ . Это положение явилось основой для разработки приемов по устранению неравномерных изменений объема золы при ее твердении [15].

**Фракционирование золы.** Путем отсева рядовой высококальциевой золы на ситах 0085 и 0063 были получены три фракции золы.

Из теста пластичной консистенции, полученного затворением рядовой золы и выделенных фракций, готовили образцы, подвергавшиеся пропариванию при  $90^\circ\text{C}$  по режиму  $2+10+2$  ч и запариванию в автоклаве при  $175^\circ\text{C}$  по режиму  $2+8+2$  ч. Результаты испытаний образцов приведены в табл. 10 и на рис. 17.

Как рядовая зола, так и выявленные фракции с размером частиц более 60 мкм характеризуются интенсивным набуханием при водотепловой обработке, величина которого достигает 2,6% у пропаренных и 5% у запаренных образцов, возрастая с увеличением степени заглаживания  $\text{CaO} + \text{MgO}$ . Образцы на рядовой золе имеют начальную прочность в 3,1—5 МПа, в то время как об-

Таблица 10. Влияние фракционирования пылевидной золы на ее свойства

Вид золы	Содержание активных СаО+MgO, %			Объемные изменения на приборе Ле Шателье, мм		Линейные деформации (набухание), мм/м		Трещинообразование на кольцах Лермита		Прочность при сжатии, МПа	
	в исходной золе	пропаривание при 90°C (2+10 ч)	запаривание при 175°C (2+8+2 ч)	пропаривание	запаривание	пропаривание	запаривание	пропаривание	запаривание	пропаривание	запаривание
Рядовая, $S = 1768 \text{ см}^2/\text{г}$	10,6	4,8	1,7	35	60,5	34,5	75	Сквозные трещины по всей поверхности	Глубокие трещины сквозные по всей поверхности	3,1	5
Крупная фракция, $S = 780 \text{ см}^2/\text{г}$	6,4	5,1	3	23,5	39,9			Образцы разрушились			
Средняя фракция, $S = 2500 \text{ см}^2/\text{г}$	6,1	4,8	2,9	20	39,5	50		То же			
Мелкая фракция, $S = 5100 \text{ см}^2/\text{г}$	11,2	2,5	0,8	10,1	15,2	15,1	17,2	Две мелкие трещины	Одна глубокая трещина	3,8	7,2
Рядовая, молотая	4,3	1,2	0,9	6,3	10,5	6,8	7,9	Мелкие трещины	Мелкие трещины	1,8	2,8
Молотый топливный гранулированный шлак, 85%+СаО 5% 10%+гипс	7,5	0,8	Нет	2,5	3,1	0,39	0,42	Нет	Нет	15,5	24

разцы из средней и крупной фракций полностью разрушаются. При переходе к мелкой фракции золы линейные и объемные деформации заметно снижаются, а прочность при сжатии существенно возрастает. Повышается также трещиностойкость. Следует подчеркнуть, что в образцах из мелкой фракции достигается наиболее полное загашивание свободных окисей кальция и магния на 77,7% при пропаривании и на 92,9% при запаривании в автоклаве.

Сопоставление данных табл. 10 позволяет сделать вывод о преимущественной роли в линейных деформациях  $\text{CaO} + \text{MgO}$  крупных фракций золы с размером отдельных частиц — агрегатов свыше 60 мкм. Это объясняется различной толщиной оболочек стеклофазы вокруг кристалликов окисей кальция и магния.

В мелких частицах толщина таких оболочек не превышает 1—3 мкм и стеклофаза успевает гидратироваться в первые часы водотепловой обработки, открывая доступ воде к кристалликам  $\text{CaO} + \text{MgO}$  на периферии частицы. Последующее увеличение объема этих кристалликов при гидратации приводит к растрескиванию прилегающих стекловидных пленок и способствует прониканию воды от периферии к центру частицы, с вовлечением в процесс гидратации  $\text{CaO} + \text{MgO}$ , заключенных во внутренних участках. Благодаря этому уже в процессе водотепловой обработки практически завершается гашение окисей кальция и магния в мелких частицах. Одновременно, за счет гидролиза стеклофазы в щелочной среде, возникают низкоосновные гидросиликаты кальция, гидрогранаты, а в присутствии двуводного гипса — также и гидросульфоалюминаты кальция, цементирующие частицы золы и придающие образцам прочность в 3,8—7,2 МПа.

Крупные частицы золы содержат кристаллики  $\text{CaO} + \text{MgO}$  под более толстой оболочкой стеклофазы, достигающей 5—10 мкм. Такая оболочка гидролизуеться значительно медленнее и к концу водотепловой обработки образцов в золе крупных фракций сохраняется 45,3—79,7% негидратированных окисей кальция и магния. В то же время недостаточное развитие процессов гидролиза стеклофазы в таких образцах отрицательно сказывается на количестве цементирующего вещества и прочности возникающей структуры, делая последнюю весьма чувствительной к действию растягивающих усилий.



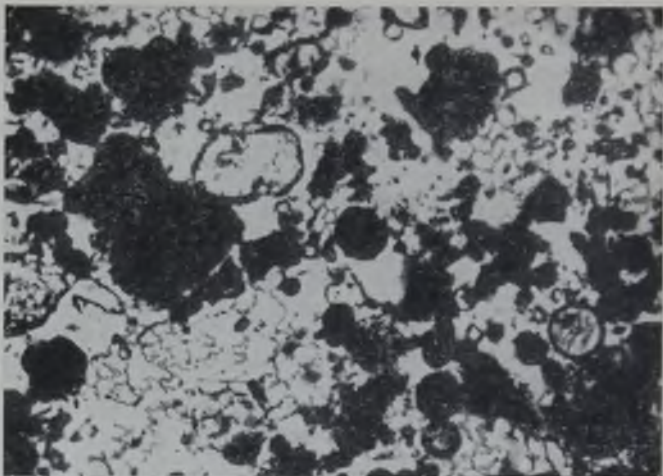


РИС. 18. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ГАШЕНИЕ РЯДОВОЙ ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВОЙ ЗОЛЫ ВОДЯНЫМ ПАРОМ. ПРОХОДЯЩИЙ СВЕТ, НИКОЛИ 11,  $\times 400$

Таким образом, установлена возможность снижения прироста объема золы за счет ее фракционирования с удалением медленно гидратирующихся и наиболее опасных частиц размером 60 мкм и выше.

**Предварительное гашение рядовой золы.** Как видно из данных табл. 10, пропаривание и автоклавная обработка рядовой золы не обеспечивают более или менее полной гидратации свободных  $\text{CaO} + \text{MgO}$ . Несколько лучшие результаты дает кратковременная обработка горячей золы (с температурой  $400^\circ\text{C}$  и выше) водяным паром, приводящая к растрескиванию стекловидных оболочек, окружающих кристаллики  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  (рис. 18). Однако такой способ гашения золы технически сложен и экономически неэффективен.

**Измельчение рядовой золы.** Для определения влияния тонины помола и некоторых химических добавок — активизаторов твердения на объемные и линейные деформации затвердевшего зольного теста были проверены различные схемы предварительной механической обработки рядовой золы в шаровой мельнице (табл. 11).

Опытами установлено, что как сухой, так и мокрый

Т а б л и ц а 11. Влияние помола золы на ее свойства

Способы механического разрушения зерен золы Назаровской ГРЭС	Объемные изменения	Линейные деформации			Трещинообразование	Объемная масса образца после пропаривания, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии после пропаривания (над чертой — без формы, под чертой — в форме), МПа
	изменение объема образца после пропаривания на приборе Ле Шателье, мм	набухание образца, твердевшего без форм, сразу после пропаривания, мм/м	усадка высушенного образца, твердевшего без форм, мм/м	усадка высушенного образца, твердевшего в форме после пропаривания, мм/м	характер трещин после пропаривания на кольцах Лермита		
Сухой помол золы до остатка на сите 10 000 отв/см <sup>2</sup> =0%	1,5	5,7	1,6	2,25	На поверхности кольца одна глубокая трещина	1600	<u>8,5</u> 12
Сухой помол золы с 0,2% ССБ до остатка на сите 5100 отв/см <sup>2</sup> =5%	16	14	2,4	2,34	Много мелких трещин на поверхности кольца и на боковых сторонах	1580	<u>4</u> 6
Мокрый помол золы с водой при температуре 90°С, В/Т=0,4	5	8,5	2,7	2,7	Поверхность кольца в мелких трещинах, одна сквозная	1560	<u>6</u> 8,5
Мокрый помол золы с 2% CaCl <sub>2</sub> , В/Т=0,4	1,5	0,15	2,91	3,81	Трещины сквозные с двух сторон по бокам	1510	<u>15</u> 19
Мокрый помол золы с 2% CaCl <sub>2</sub> и 0,2% ССБ, В/Т=0,4	2,5	0,32	2,68	3,85	Одна трещина сквозная	1540	<u>12</u> 15,5
Шлаковое вяжущее 85+10+5% (шлак+известь+гипс)	2,5	0,39	1,80	1,67	То же	1560	<u>15,5</u> 18,3

помол золы способствует уменьшению набухания зольного теста, определенного методом Ле Шателье, в 6—10 раз по сравнению с набуханием образцов из рядовой золы. Кроме того, в 5—8 раз снижаются линейные деформации (т. е. набухание образцов при пропаривании без форм) и значительно повышается прочность: при сжатии до 8 МПа и при изгибе до 2,5 МПа, против 3,1 и 1 МПа для образцов, изготовленных из рядовой немолотой золы.

В то же время измельчение до остатка на сите 0085 в 1,5% оказалось недостаточным, из-за чего образцы имели заметное увеличение в объеме на 16 мм по Ле Шателье, или на 1,3%.

Наибольшая полнота гашения  $\text{CaO} + \text{MgO}$  при соответственном снижении объемных и линейных деформаций характерна для проб золы, измельчавшейся в растворе хлористого кальция. Установлено, что мокрый помол рядовой золы в присутствии 2%  $\text{CaCl}_2$  почти полностью устраняет деформативные изменения пропаренных образцов, но при дальнейшем хранении их на воздухе способствует развитию повышенных усадочных деформаций до 3,8 вместо 2,2 мм/м при сухом помоле без  $\text{CaCl}_2$ .

Отмеченное улучшение свойств золы, обработанной комплексным методом, объясняется быстрым разрушением стекловидных оболочек, изолирующих мелкие кристаллики окиси кальция и магния от непосредственного контакта с водой, при одновременном увеличении в 1,5—2,5 раза удельной поверхности золы.

В результате механической обработки в частицах стекла развиваются трещины, по которым к кристалликам окиси кальция и магния поступает вода и происходит их гидратация. Присутствие же ускорителя твердения  $\text{CaCl}_2$  способствует интенсификации процессов гидролиза стеклофазы и быстрому формированию кристаллического сростка гидратных новообразований. Благодаря этому основные процессы гидратации золы завершаются в первой стадии твердения, т. е. при пропаривании или электропрогреве.

Однако при практической реализации указанных приемов целесообразнее подвергать рядовую золу, применяемую в качестве заполнителя в газозолобетонных панелях или сырья для вяжущего, мокрому помолу без добавки  $\text{CaCl}_2$  в шаровых или вибромельницах до удель-

ной поверхности не более 3000—3500 см<sup>2</sup>/г. Эта рекомендация вызвана тем, что хотя введение CaCl<sub>2</sub> при помоле золы и способствует полному устранению объемных изменений зольного теста, но в то же время и увеличивает усадочные деформации затвердевших образцов в 1,5—2 раза по сравнению с усадочными деформациями образцов, изготовленных из рядовой золы, а также из золы тонкого сухого или мокрого помола, но без добавки CaCl<sub>2</sub>. Кроме того, хлористый кальций будет способствовать коррозии металлических частей мельницы и других агрегатов. Измельчение же без CaCl<sub>2</sub> дает несколько худшие, но практически приемлемые результаты при отсутствии перечисленных выше «побочных» действий.

Таким образом, исследуемые шлаки и золы могут быть основными сырьевыми материалами для производства шлакозольных ячеистых бетонов. При использовании их в качестве тонкодисперсного активного заполнителя в ячеистых бетонах гранулированные и отвалынные шлаки подвергали сухому или мокрому помолу до удельной поверхности от 1500 до 3000 см<sup>2</sup>/г, а при изготовлении шлакового вяжущего от 3000 до 3500 см<sup>2</sup>/г (по шлаку). Сверхкислые пылевидные золы использовали в качестве заполнителя без дополнительной механической обработки при дисперсности золы, характеризуемой удельной поверхностью не ниже 1800—2000 см<sup>2</sup>/г. Для получения зольных вяжущих осуществлялся совместный помол золы и активизаторов твердения (извести, гипса, цемента) до удельной поверхности в 4000—4500 см<sup>2</sup>/г.

Сульфатосодержащие золы и золы с повышенным содержанием CaO+MgO (до 20—35%) независимо от способа их использования дополнительно измельчали по сухому (для вяжущих) и по мокрому (для заполнителей) способам до удельной поверхности 3000—3500 см<sup>2</sup>/г.

## 2. ВЛИЯНИЕ ВИДА И РАСХОДА СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СВОЙСТВА ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

При проектировании составов ячеистых бетонов на основе шлаков и зол большое влияние имеет оптимальная дозировка составляющих.

Нами было изучено влияние вида и количества вяжущего и заполнителя на прочность ячеистых бетонов с объемной массой от 1200 до 400 кг/м<sup>3</sup>. При этом для

89 Таблица 12. Составы шлакозольных ячеистых бетонов различной объемной массы

Вид шлаков и зол	Состав вяжущего (% по массе): : шлак (зола): : известь : гипс	Отношение вяжущего к заполнителю (шлак, зола, песок)	Добавка портландцемен- та, в кг/м <sup>3</sup> бетона	Объемная масса в сухом состоя- нии, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	
					пропарива- ние при 95° С	запаривание при 175° С
Г р а н у л и р о в а н н ы е   ш л а к и						
Высококальциевые (доменные и фосфор- ные)	85 : 10 : 5	1 : 0,5 (зола, молотый шлак)	50	1200—1000	10—8	12—11
		1 : 0,5 (молотый песок)	50	1000—800	8—6	9—7
		1 : 0,25 (молотый песок)	—	700—600	4,5—4	5,5—4,5
		1 : 0	—	500—400	1,5—1	2—1,5
Среднекальциевые (доменные и топлив- ные)	80 : 15 : 5	1 : 0,5 (зола, молотый шлак)	50	1200—1000	10—8	12—10
		1 : 0,25 (молотый шлак)	50	1000—800	7,5—6	8,5—7
		1 : 0,25 (молотый песок)	50	700—600	4,5—4	5,5—4,5
		1 : 0	—	500—400	1,2—0,9	1,8—1,5
Низкокальциевые, сверхкислые (топлив- ные и цветной метал- лургии)	75 : 20 : 5	1 : 0,5 (зола, молотый шлак)	50	1200—1000	9—7,5	11—8,5
		1 : 0,25 (молотый шлак)	60	1000—800	7—5,5	8,5—7,5
		1 : 0,25 (молотый шлак)	50	700—600	4—3,5	5—1

		1 : 0		500—400	1—0,8	1,5—1,2
Пылевидные золы						
Высококальциевая зола	30 : 15 : 5	1 : 0,5 (шлак, зола)	50	1000—900	6,5—5,5	7,5—6
		1 : 0,5 (молотый песок)	50	800—700	4,5—3,5	5,5—4,5
		1 : 0	50	550—450	1,2—0,8	1,5—1,2
Низкокальциевая (сверхкислая) зола	60 : 35 : 5	1 : 0,5 (шлак, зола)	75	1000—900,	6—5	7—6
		1 : 0,5 (шлак, зола)	75	800—700	4—3	5—4
		1 : 0	50	550—450	1—0,6	1,5—1
Сульфатосодержащая зола	80 : 15 (портланд-цемент) : 5	1 : 0,5 (зола)	—	1000—900	6,5—5	7,5—6
		1 : 0,5 (зола)	—	800—700	4,5—3,5	5,5—4,5
		1 : 0	—	550—450	1,2—0,8	1,5—1,2
Шлакопортландцемент на «сверхкислых» шлаках	60 : 35 (портланд-цемент) : 5	1 : 0,5 (молотый шлак)	—	1200—1000	11—9	12,5—11,5
		1 : 0,5 (молотый шлак, зола)	—	1000—880	9—7	9,5—8
		1 : 0,25 (шлак, зола)	—	700—600	5,5—4,5	6—5,5
		1 : 0	—	500—400	1,5—1	2—1,5

объемной массы бетонов 1200—1000; 800—600; 500—400 кг/м<sup>3</sup> макропористость была в пределах 25—35; 50—65; 75—80% соответственно.

В качестве вяжущего применяли шлаковые и зольные вяжущие без добавки и с добавкой портландцемента. В качестве кремнеземистого компонента использовали молотые низкокальциевые гранулированные шлаки, пылевидные золы и кварцевый песок.

Состав ячеистых бетонов определяли на образцах-кубах размером 10×10×10 см для заданной объемной массы. Термообработку осуществляли в пропарочных камерах при температуре 90—95°С и автоклавах при температуре 175°С. Режим термообработки: 2+(10—8)+2 ч.

Составы сырьевой смеси, а также свойства полученного газобетона приведены в табл. 12.

Подвижность ячеистобетонной массы характеризовалась диаметром расплыва по Суттарду и находилась в пределах 10—18 см.

Результаты определения влияния количества шлакозольного вяжущего, портландцемента, молотого гранулированного шлака, песка, золы представлены в табл. 12 и на рис. 19.

Анализ результатов исследований свидетельствует о принципиальной возможности получения ячеистых бетонов на основе бесклинкерных и малоклинкерных шлакозольных вяжущих при мокром и сухом помоле, способных твердеть при повышенном и атмосферном давлении (рис. 20). При этом прочность при сжатии находилась в пределах 12—8 МПа при объемной массе в 1200—1000 кг/м<sup>3</sup>, 9—6 МПа при объемной массе в 1000—800 кг/м<sup>3</sup>, 5,5—4 МПа при объемной массе в 700—600 кг/м<sup>3</sup> и 2,5—1 МПа при объемной массе в 500—400 кг/м<sup>3</sup>. Верхние значения прочности относятся к ячеистым бетонам, изготовленным на основе высоко- и среднекальциевых гранулированных шлаков, и к ячеистым бетонам, изготовленным на основе кислых гранулированных шлаков и пылевидных зол с добавкой 50—75 кг портландцемента на 1 м<sup>3</sup> бетона.

Эмпирически зависимость прочности при сжатии от объемной массы может быть представлена следующими формулами:

а) для бесцементного газозолобетона

$$R_{сж} = 1,71 \cdot 10^{-4} \gamma_0 - 0,118 \gamma_0 + 28;$$

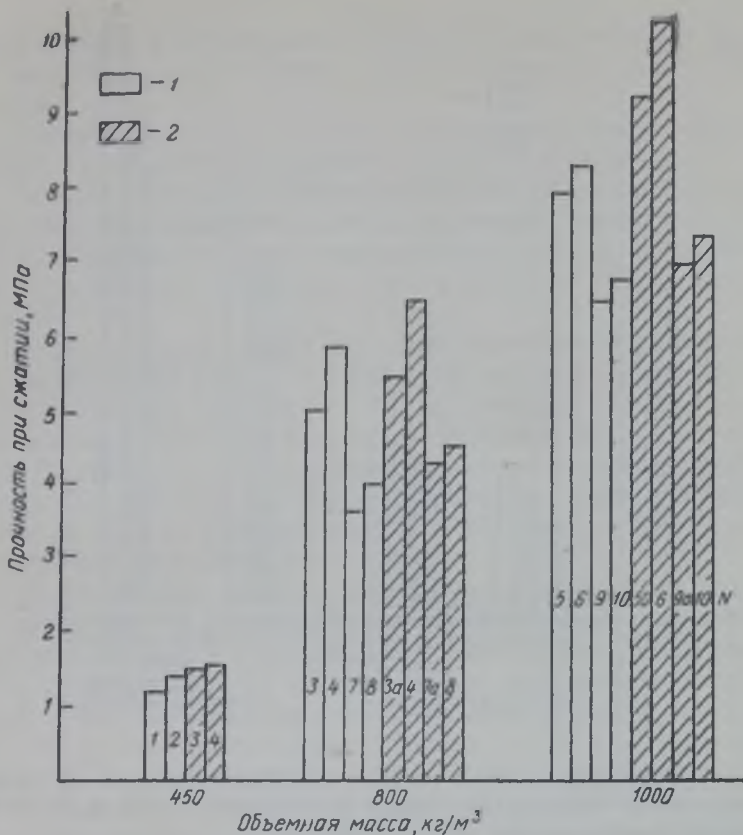


РИС. 19. ПРОЧНОСТЬ ПРИ СЖАТИИ ПРОПАРЕННОГО ГАЗОШЛАКОБЕТОНА РАЗЛИЧНОЙ ОБЪЕМНОЙ МАССЫ. ЦИФРЫ — НОМЕРА СОСТАВОВ.

Составы шлаковых вяжущих (шлак : известь : портландцемент : гипс): 60 : 10 : 25 : 5 — 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 (1); 70 : 10 : 15 : 5 — 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 (2)  
 1 — из топливных сверхкислых гранулированных шлаков; 2 — из доменных гранулированных шлаков. Состав бетона: 1 : 0 для составов 3, 4, 5, 6; 1 : 0,5 для составов 7, 8, 9, 10

б) для малоцементного газозолобетона

$$R_{сж} = 1,71 \cdot 10^{-4} \gamma_0 - 0,118 \gamma_0 + 32.$$

Введение в состав 0,5 и 1 части молотого гранулированного шлака или золы на 1 часть вяжущего снижает прочность затвердевшего бесклинкерного бетона на 20—30%. Прочность ячеистого бетона при запаривании в автоклаве повышается на 15—25%. Таким образом, вид шлака или золы, состав вяжущего и бетона, а также ус-



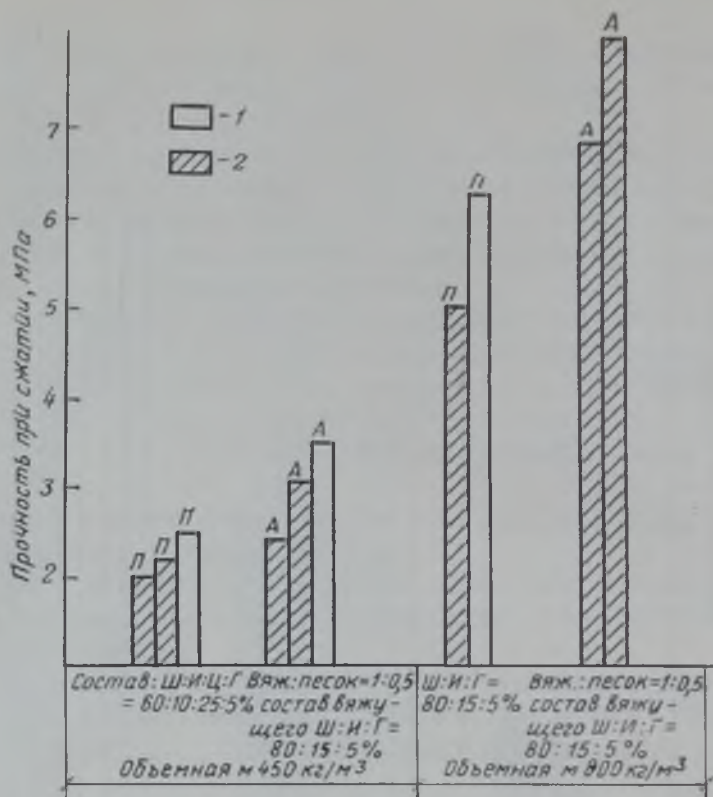


РИС. 20. ПРОЧНОСТЬ ПРИ СЖАТИИ ГАЗОШЛАКОБЕТОНА НА ОСНОВЕ ВЫСОКО- И СРЕДНЕКАЛЬЦИЕВЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ШЛАКОВ ПРИ СУХОМ И МОКРОМ ПОМОЛЕ МАТЕРИАЛОВ

П — пропаривание 3+10 ч при 95—98° С; А — автоклавная обработка 3+8+4 ч при 175° С; 1 — сухой способ помола; 2 — мокрый способ помола

ловия тепловлажностной обработки существенно влияют на прочность шлакозольного бетона с пористой структурой. Полученная прочность при сжатии для пропаренного и запаренного ячеистого бетона из шлаков и зол удовлетворяет требованиям, предъявляемым к традиционным ячеистым бетонам, изготовленным на основе извести, портландцемента или на смешанном вяжущем.

Существенное влияние на свойства шлакозольного ячеистого бетона оказывает не только основное сырье — шлаки и золы, но и состав и свойства извести, применяемой в качестве активизатора твердения в шлаковых и зольных вяжущих. Оценка качества извести осуществляется по ГОСТ 9179—70, требованиями которого нормируется скорость гашения, содержание непогасившихся

частиц  $MgO$  и суммарное количество  $CaO+MgO$  в форме окисей и гидроксидов (так называемая «активность»).

Однако не всегда известь, удовлетворяющая требованиям указанного стандарта, является пригодной для изготовления бездефектных ячеистобетонных изделий. Для более надежной оценки качества извести необходимо знать ее минералогический состав и размеры кристаллов основного компонента — окиси кальция.

Работы, проведенные на конструктивно-теплоизоляционном газосиликате с объемной массой  $700 \text{ кг/м}^3$  и прочностью при сжатии  $5\text{—}9 \text{ МПа}$ , показали, что известь, содержащая пережог в количестве более  $5\%$ , является непригодной для производства ячеистых силикатных бетонов. Присутствие  $3\text{—}5\%$  пережженных частиц приводит к снижению прочности на  $15\text{—}25\%$  и ухудшению морозостойкости газосиликата.

Замена тонкомолотого известково-песчаного вяжущего известково-шлаковым или зольным в ячеистых бетонах, как показали многолетние исследования МИСИ им. В. В. Куйбышева [25, 27, 31], позволяет снизить расход извести в  $2\text{—}3$  раза. Это дает основание полагать, что при производстве бесклинкерных ячеистых бетонов на шлаковых и зольных вяжущих может быть использована известь худшего качества, чем при производстве известково-песчаных бетонов и изделий, в том числе и с содержанием пережога более  $5\%$ .

С целью уточнения влияния составляющих промышленной извести на свойства шлаковых вяжущих и ячеистых бетонов и определения технических требований к качеству извести как активизирующей добавки была проведена экспериментальная работа, результаты которой излагаются ниже.

Шлаковые вяжущие готовили на основе доменного гранулированного шлака Чусовского металлургического завода и топливного гранулированного шлака (жидкого удаления) Мироновской ГРЭС.

В качестве активизатора твердения применяли негашеную известь различных известковых заводов и заводов силикатного кирпича.

При совместном помоле шлака и извести в шаровую мельницу для регулирования сроков схватывания и интенсификации процессов твердения шлаковых вяжу-

щих вводили 5% двуводного гипса Новомосковского месторождения.

Составы шлаковых вяжущих приведены в табл. 13.

Т а б л и ц а 13. Составы вяжущих

Условия твердения	Основной компонент вяжущих	Содержание компонентов в вяжущих по массе, %			
		шлак	известь	гипс	молотый кварцевый песок
Запаривание в автоклаве при 175° С	Чусовской шлак	80	15	5	—
	Мироновский шлак	65	20	5	10
Пропаривание в камере при 90° С	Чусовской шлак	85	10	5	—
	Мироновский шлак	80	15	5	—

Шлаковые вяжущие измельчали до остатка на сите 008 до 5%, что соответствовало удельной поверхности для шлака около 3000 см<sup>2</sup>/г.

Специально исследовали влияние качества извести на свойства вяжущего и ячеистого бетона на его основе.

Одновременно испытывали шлаковые вяжущие на равномерность изменения объема в лепешках. Это испытание все вяжущие выдержали.

В табл. 14 показаны результаты определения свойств шлаковых вяжущих веществ.

Качество извести заметно влияет на водопотребность шлаковых вяжущих и бетонов. Последняя повышается при увеличении количества гидрата окиси кальция. Поэтому максимальная водопотребность характерна для вяжущих и бетонов на гидратной извести, сильно загашенной извести Гжельского завода и нормально обожженной извести Люберецкого, Закамского и Корневского заводов [14, 16].

Состав извести оказывает существенное влияние и на сроки схватывания вяжущих. Замедленными сроками

Т а б л и ц а 14. Свойства шлаковых вяжущих

Вид извести	Объемная масса шлаковых вяжущих, кг/м <sup>3</sup>		Водопотребность при нормальной густоте теста в % от массы вяжущего		Сроки схватывания в 4—мин				Водопотребность раствора нормальной подвижности от массы вяжущего, %		Прочность при сжатии, МПа			
	доменный шлак	топливный шлак	доменный шлак	топливный шлак	начало		конец		доменный шлак	топливный шлак	после запаривания при 175° С		после пропаривания при 90° С	
					доменный шлак	топливный шлак	доменный шлак	топливный шлак			доменный шлак	топливный шлак	доменный шлак	топливный шлак
<b>Негашеная известь</b>	<b>Шлаковое вяжущее на доменном и топливном гранулированном шлаке</b>													
Домодедовская	1060	1100	29	30	2—00	2—00	5—50	6—30	53	54	20	18,5	13,5	9,5
Люберецкая	1075	1098	31	32	0—15	0—15	1—00	1—10	56	56	24,6	21	15,5	11
Гжельская	1080	1135	32	33	1—00	1—30	4—30	5—00	54	56	22	20	14,3	11
Краснопресненская	1050	1150	30	30	0—38	0—45	4—13	4—30	53	53	20,5	19	13	10
Закамская	1070	1100	31	32	0—25	0—38	3—10	3—10	57	58	25,5	22,5	16	12,8
Корневская	1095	1145	31	31	0—25	0—36	3—10	4—05	55	56	28	23	17	13
Иркутская	1045	1100	30	30	0—30	0—35	4—40	4—30	54	54	21	19	14	11

схватывания отличаются вяжущие на извести с высоким содержанием гидрата окиси кальция и пережженной извести. Остальные вяжущие начинают схватываться через 15—38 мин после затворения.

Результаты испытания показали, что прочность при сжатии шлакового вяжущего автоклавного твердения может изменяться от 20 до 28 МПа и пропаренного бетона от 13 до 17 МПа (для вяжущих из доменного гранулированного шлака Чусовского завода) и от 23 до 15 и от 13 до 7,5 МПа соответственно для вяжущих из гранулированного топливного шлака Мироновской ГРЭС.

Установлено, что снижение прочности ячеистого бетона находится в аналогичной зависимости от вида извести и может быть обусловлено двумя факторами: сильной загашенностью извести, использованной в качестве активизатора, или присутствием пережога (крупнокристаллической окиси кальция с размером свыше 10 мкм) и окиси магния.

Присутствие пережога окиси кальция и магния в извести отрицательно сказывается на прочности бетона, которая закономерно уменьшается при повышении количества этих компонентов. В связи с этим минимальные прочностные показатели отмечены у образцов из ячеистого бетона, изготовленного на шлаковых вяжущих, домодедовской, краснопресненской и иркутской извести, содержавших соответственно 11,8; 5,4 и 4,6% медленногасившихся частиц окиси кальция (пережога) и окиси магния. Однако указанные образцы на извести с пережогом не имели внешних дефектов — трещин, вспучивания по верхней плоскости и других — и обладали удовлетворительной морозостойкостью.

Приведенные данные позволяют считать допустимым использование при изготовлении шлакозольных вяжущих и ячеистых бетонов из них, негашеной извести с суммарным содержанием пережженных частиц  $\text{CaO} + \text{MgO}$  до 10%. При этом наилучшим качеством характеризуются вяжущие и бетоны, изготовленные с применением негашеной высокоэкзотермической быстро- или среднегасящейся извести (со скоростью гашения по ГОСТ 9179—70 в 10—15 мин при максимальной температуре гашения более 70°С).

При определении влияния вида и состава цемента на процесс твердения газозолобетона было использовано 5 видов цемента: рядовой (близкий к алитовому), алито-

вый и алюминатный портландцементы, шлакопортландцемент и пуццолановый портландцемент. Влияние этих цементов определялось на прочностные и деформативные характеристики газозолобетона объемной массой 800—850 кг/м<sup>3</sup>, изготовленного на основе пылевидной золы московской ТЭЦ-11. Расход цемента составлял 250 кг/м<sup>3</sup> (табл. 15).

Т а б л и ц а 15. Влияние вида цемента на свойства газозолобетона

Вид портландцемента	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		Влажность по массе, %	Усадка, мм/м	Прочность, МПа			
	после термообработ- ки	в сухом состоянии			при сжатии		при изгибе	
					после термообработ- ки	в сухом состоянии	после термооб- работки	в сухом состоянии
Рядовой	1180	870	39	1,78	4,2	6,8	1,3	1,5
Алитовый	1250	900	46	1,82	4,9	6,6	1,5	1,7
Алюминатный	1168	851	41	1,85	4,5	5,7	1,3	1,5
Пуццолано- вый	1234	880	46	2,17	3,7	5	1,1	1,5
Шлакопорт- ландцемент	1183	816	45	2,02	3,7	4,5	1,1	1,3

П р и м е ч а н и е. Режим пропаривания при температуре 80—90° С 2+10+2 ч.

Проведенные исследования показывают, что за счет изменения вида и состава цемента можно менять физико-технические показатели ячеистого золобетона. Так, используя цементы с повышенным содержанием алита и трехкальциевого алюмината, можно получить газозолобетон с максимальной прочностью и минимальными усадочными деформациями. Причем повышение количества алита за счет уменьшения содержания трехкальциевого алюмината и алюмоферрита кальция способствует повышению воздухостойкости бетона. Использование шлакопортландцемента и пуццоланового портландцемента при-

водит к снижению прочности газобетона, ухудшает его воздухоустойкость и увеличивает усадочные деформации.

Таким образом, для производства безавтоклавного газозолошлакобетона следует применять быстротвердеющие алитово-алюминатные цементы, для автоклавного — рядовые, белитовые портландцементы, а также шлакопортландцементы и пуццолановые портландцементы.

Обобщая результаты исследований по I технологическому этапу — подготовке сырьевых материалов для производства газозолошлакобетона из различных видов шлаков и зол, можно сделать общий вывод, что любое некондиционное сырье после соответствующей обработки приобретает требуемые свойства, предопределяющие получение на его основе качественного ячеистого бетона с заданными свойствами.

Формирование капиллярно-пористой структуры ячеистого бетона происходит в результате действия технологических факторов в процессе приготовления смесей, образующих коагуляционно-кристаллизационные структуры при схватывании и твердении.

Процессы микро- и макроструктурообразования ячеистого бетона зависят от вида, свойств и количества сырьевых материалов, от применяемого газо- или пенообразователя, коэффициента полезного их использования, от температуры воды затворения и величины водотвердого отношения. Критерием оценки образовавшейся пористой структуры затвердевшего бетона являются прочностные и деформативные характеристики для данной объемной массы. На основе выполненных исследований установлена зависимость степени пористости шлакозольного бетона и его свойств от влияния различных технологических факторов.

### 3. ВЛИЯНИЕ ВИДА И КОЛИЧЕСТВА ГАЗООБРАЗОВАТЕЛЯ

Ячеистый бетон изготовляли на основе молотого топливного гранулированного шлака и низкокальцевой золы. Деформативные изменения определяли по комплексной методике. Характеристики деформативных изменений приведены в табл. 16. Сравнение показателей ячеистого бетона, изготовленного на различных видах газообразователей, позволяет сделать вывод, что предпочтение надо отдать алюминиевой пудре, обработанной поверхностно-активными веществами. Применение ПАВ уско-

**Таблица 16. Влияние количества и вида газообразователя на деформативные изменения пропаренного газошлакобетона**

Вид и количество газообразователя на 1 м <sup>3</sup> ячеистого бетона, г. Расход воды, л	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>			Полная усадка после пропаривания, мм/м	Объемные изменения на приборе Ле Шателье, см		Трещинообразование на образцах-кольцах Лермита	Прочность при сжатии в сухом состоянии, МПа
	до пропаривания	после пропаривания	в сухом состоянии		через 6 ч после формирования	после пропаривания		

**Газошлакобетон (75% шлака + 20% извести + 5% гипса)**

Алюминиевая пудра ПАК-3 — 500, воды — 300	1400	1270	1030	2,2	3,2	3,6	Одна глубокая и две тонких	8,5
ПАК-3 — 500, воды — 350	1210	1050	890	2,3	6,4	3	Нет	5,4
ПАК-3 — 700, воды — 350	1000	880	760	2,6	5,7	2,8	»	4,8
ПАК-3 — 800, воды — 350	870	700	610	2,6	6,1	2,7	»	2,5
ПАК-3 — 800, воды — 270 (бетон с добавкой 40% гранулированного шлака)	1350	1270	1150	1	2,8	2,2	»	6,9
ПАК-3 — 700, воды — 280 (вибровспучивание)	1100	890	790	1,8	2,1	2,1	»	5,9
Пергидроль — 1% от массы составляющих	1520	1380	1210	2,3	0,9	2,3	»	8,7
Пергидроль — 2%	1220	1070	900	2,5	2	2,5	»	5,1
Пергидроль — 3%	1055	980	850	2,8	3,1	2,8	»	5,2

**Газозолобетон**

60% золы + 35% извести + 5% гипса и 75 кг портландцемента, ПАК-3 — 400	1215	1010	835	2,7	6,8	3,5	Две трещины и мелкие на поверхности	5,3
250 кг портландцемента + 550 кг золы, 30 кг извести ПАК-3 — 400	1200	990	850	2,5	4,5	2,4	Мелкие на поверхности	6,1
ШПЦ (топливный гранулированный шлак 55% + 40% портландцемента + 5% гипса) и 300 кг золы, ПАК-3 — 400	1210	950	865	2,2	2,3	2	Нет	6,8



ряет газовыделение и несколько увеличивает количество выделяющегося газа, что повышает коэффициент использования газообразователя в бетоне. Положительное влияние на процесс газовыделения в шлакозольном бетоне оказывает вибрационное воздействие бетона. При этом прочность при сжатии газобетона возрастает на 15—25% против прочности бетона, изготовленного литьевым методом. Усадочные деформации снижаются на 25—30%, что способствует повышению трещиностойкости бетонов. При использовании пергидроля процесс газовыделения опережает нарастание пластической вязкости раствора. В результате несовместности этих процессов в структуре ячеистого бетона на пергидроле отмечаются большая неоднородность и наличие пор сквозного характера. Это увеличивает степень водопоглощения газобетона и ухудшает его деформативные свойства.

В работе исследовалось также влияние способов обезжиривания алюминиевой пудры на характер пористости газошлакобетона, полученного с расходом алюминиевой пудры 400 г/м<sup>3</sup> бетона в идентичных условиях. Пудру обезжиривали путем прокаливания в окислительной среде при температуре 200°С и обработкой растворами канифольного мыла, моющего вещества «Новость» и СДБ.

Характер и размеры пор изучали с помощью бинокулярного микроскопа МБС-2 при увеличении от 20 до 40 раз. Результаты замера пор приведены в табл. 17.

**Т а б л и ц а 17.** Влияние способа обезжиривания алюминиевой пудры на размер пор в ячеистом бетоне

Обезжиривание пудры	Размер пор, мм		
	наибольший размер каверн	размер пор	преобладающий размер пор
Раствором канифольного мыла	2	0,1—0,3	0,15—0,25
Порошком «Новость»	3	0,1—0,4	0,2—0,25
Раствором СДБ	3	0,15—0,35	0,2—0,25
Прокаливанием при 200°С	2	0,1—0,3	0,15—0,2

Из данных табл. 17 видно, что способ обезжиривания алюминиевой пудры почти не влияет на характер пористой структуры ячеистых бетонов. Несколько лучшей (бо-

Таблица 18. Различные способы обезжиривания алюминиевой пудры и их влияние на свойства пропаренного газшлакобетона (расход пудры 500 г/м<sup>3</sup> бетона)

Обезжиривание пудры	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>				Прочность, МПа				Усадка после пропаривания, мм/м
	до вспучивания	вспученной газомассы	газобетона после термообработки	в сухом состоянии	при сжатии		при изгибе		
					после термообработки	в сухом состоянии	после термообработки	в сухом состоянии	
Прокаливанием при 200°С	1454	1295	1280	830	5,3	6,1	1,1	1,6	1,2
Порошком «Новость»	1523	1290	1277	870	5,6	6	1	1,5	1,19
СДБ	1500	1300	1285	860	6,8	6,3	1,4	1,6	1,16
Канифольным мылом	1500	1300	1250	865	5,5	6,5	1,6	1,8	1,27
СДБ через 6 ч после приготовления эмульсии	1520	1460	1330	1100	7,1	8,9	1,8	2,1	1,01
Необработанная	1535	1470	1350	1270	8,6	9,3	1,6	1,8	1

лее равномерной) структурой отмечается газобетон на пудре, обработанной канифольным мылом.

В табл. 18 представлены результаты определения влияния способов обработки пудры на физико-механические свойства газшлакобетона. Наиболее высокая прочность (6,3 и 6,5 МПа) была получена при обработке пудры свежеприготовленной СДБ и канифольным мылом. Но при этом необходимо отметить и некоторое увеличение объемной массы газобетона (до 7—10%) по сравнению с образцами, изготовленными на прокаленной пудре. На влажностные усадочные деформации способы обработки алюминиевой пудры, вероятно, влияния не оказывают. В результате работ установлено, что на свойства газобетона отрицательно влияют длительные сроки хранения обработанной пудры, которые не должны превышать 3—4 ч. При введении в воду поверхностно-активных веществ наряду с обезжириванием пудры происходит расклинивание частичек пудры друг от друга, что делает суспензию тонкодисперсной и приводит к более равномерному распределению окиси алюминия в газомассе, в результате чего получается материал с более мелкими порами. Длительные наблюдения за поведением газобетона показали, что использование непрокаленной и необработанной ПАВ алюминиевой пудры приводит к дополнительным объемным изменениям в уже затвердевшем ячеистом бетоне. Так, на непрокаленной пудре с расходом  $500 \text{ г/м}^3$  был получен бетон с объемной массой  $990 \text{ кг/м}^3$ , на прокаленной —  $750 \text{ кг/м}^3$  и на водно-алюминиевой суспензии —  $730 \text{ кг/м}^3$  в сухом состоянии. Раздвижка игл на приборе Ле Шателье после пропаривания бетона находилась в пределах 3,1—3 см для трех видов газообразователей, а после хранения в воде в течение месяца наблюдалось дальнейшее увеличение расстояния между иглами: для шлакобетона на непрокаленной пудре до 3,9 см, на прокаленной 3 и на водно-алюминиевой суспензии — 3 см. Увеличение объема, вероятно, происходит за счет насыщения водой ячеистого бетона, продолжающейся гидратации золы и шлака с активизаторами твердения и продолжавшегося взаимодействия алюминиевой пудры с оставшимся в бетоне после пропаривания в свободном состоянии гидратом окиси кальция.

На объемную массу газобетона оказывает решающее влияние содержание газообразователя (алюминиевой

пудры) в ячеистобетонной смеси. Это влияние сказывается до определенных пределов. При уменьшении объемной массы газобетона роль газообразователя снижается.

Опыт показывает, что значительное снижение объемной массы газобетона происходит только тогда, когда увеличение расхода газообразователя сопровождается увеличением количества воды затворения. Увеличение только количества газообразователя без повышения  $V/T$  не приводит к желаемым результатам. Таким образом, количество воды затворения также оказывает большое влияние на изменение объемной массы ячеистого бетона. Эти общие положения приемлемы и для ячеистых бетонов, изготовляемых на основе шлаков и зол.

Исследования показали, что на изменение свойств цементирующего шлакозольного вещества существенное влияние оказывает степень поризации. Так, прочность шлакового теста после пропаривания составляла 30 МПа, а при поризации его на 10% прочность понизилась на 25%. При поризации камня на 30% прочность снизилась в 2 раза, при поризации до 60—50% прочность уменьшилась в 4—5 раз. Аналогичная зависимость прослеживается и для золобетона.

Таким образом, экспериментально установлено, что с поризацией цементирующего вещества снижается объемная масса и значительно уменьшается прочность при сжатии.

Правильно подобранное соотношение газообразователя и воды затворения позволяет получать газозлакозобетон, структура которого характеризуется мелкими и равномерно распределенными порами сферической формы, обладающей повышенной прочностью, меньшей теплопроводностью, повышенной морозостойкостью.

Подбор оптимального соотношения между указанными величинами производился исходя из показателей объемной массы и прочности газозобетона после тепловлажностной обработки.

Состав газобетона и результаты исследований приведены в табл. 19.

Из данных таблицы видно, что при постоянном расходе пудры с увеличением водотвердого отношения с 0,48 до 0,52 снижается объемная масса и повышается влажность газозобетона.

Повышение  $V/T$  до 0,55 приводит к увеличению подвижности газомассы до 19—21 см. При этом наблюда-

Т а б л и ц а 19. Влияние водотвердого отношения и расхода алюминиевой пудры на свойства пропаренного газозолобетона

Расход алюминиевой пудры, г/м <sup>3</sup>	Водотвердое отношение	Подвижность массы по Суттарду, см	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		Влажность газозолобетона после термообработки, % по массе	Предел прочности при сжатии в сухом состоянии, МПа
			после термообработки	в сухом состоянии		
1	2	3	4	5	6	7
700	0,48	14	870	680	28	3,5
	0,52	16	822	635	29,5	2,7
	0,55	19	779	669	28	2,8
800	0,48	15	808	624	29,7	2
	0,52	16	722	547	32	1,1
	0,55	19	736	540	30,4	1,4
900	0,48	15	730	553	31,9	1,3
	0,52	17	655	495	32,4	1,1
	0,55	21	712	526	31,5	1,2
1000	0,48	15,5	689	519	32,8	1
	0,52	18	572	430	33	0,8
	0,55	20,5	693	523	32,5	1

Примечания: 1. Температура воды затворения 25—28° С.

2. Режим пропаривания 2+10+2 ч.

3. Удельная поверхность сверхкислой золы 2850 см<sup>2</sup>/г.

4. Состав бетона: 60 : 35 : 5 (зола : известь : гипс) + 50 кг портландцемента на 1 м<sup>3</sup> бетона.

ются прорывы газа и некоторое оседание вспучившейся ячеистой смеси.

При расходах пудры в 700 и 800 г/м<sup>3</sup> и изменении  $V/T$  от 0,48 до 0,55 величина объемной массы газозолобетона превышает заданную. При расходе пудры 900 и 1000 г/м<sup>3</sup> и изменении  $V/T$  в пределах 0,48—0,55 образцы ячеистого бетона имели объемную массу 430—553 кг/м<sup>3</sup>. Однако при расходе пудры 1000 г/м<sup>3</sup> значительная часть газа не удерживалась массой. Образовавшиеся прорывы в структуре вызвали снижение прочности на 15—20%. Таким образом, закономерность влияния расхода газобразователя и воды на изменения объемной массы и прочности при сжатии газозолошлакобетона аналогичны зависимостям, полученным для ячеистых бетонов на традиционных материалах (извести, цемента, молотом

песке). Но при этом количество алюминиевой пудры несколько изменяется. Так, при изготовлении газобетона на основе молотых кислых и сверхкислых гранулированных шлаков расход газообразователя за счет повышенной плотности шлака для заданной объемной массы должен быть увеличен на 10—15% против обычного.

При использовании пылевидной золы в ячеистом бетоне с целью сохранения заданной подвижности необходимо увеличивать расход воды на 1 м<sup>3</sup> бетона на 15—20% по сравнению с песчаным бетоном.

#### 4. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ ЗАТВОРЕНИЯ И РАСХОДА АЛЮМИНИЕВОЙ ПУДРЫ НА СВОЙСТВА ГАЗОБЕТОНА

Неравномерное распределение влаги по сечению изделий в результате ее миграции при наличии влажностного градиента вызывает в начальный период твердения напряжения в теле изделия. Это положение усугубляется температурным градиентом, возникающим при выделении тепла в процессе гидратации вяжущих и их твердения.

Тепловыделение приводит к нагреванию панелей в условиях теплообмена с окружающей средой. При этом в массе твердеющего газобетона устанавливается нестационарное температурное поле с неравномерным распределением температур по сечению изделия, что приводит к появлению знакопеременных напряжений в различных слоях бетона. В то же время при увеличении температуры воды затворения максимум тепловыделения вяжущего смещается на 7—10 ч, что соответствует по времени началу твердения газобетона и моменту возникновения минимального влажностного градиента. Это способствует ускорению твердения газобетона, и к моменту наибольшего влажностного градиента газобетон будет иметь прочную сложившуюся структуру.

Кроме того, вода затворения при производстве газобетона должна быть достаточно высокой температуры для ускорения процесса газообразования при химическом взаимодействии алюминиевой пудры с гидратом окиси кальция. При нормальной температуре 18—20°С реакция начинается во время перемешивания и длится 1,5—4 ч, в то время как при температуре 30°С реакция может закончиться через 30 мин. Исследования показали,

что при низкой температуре для получения бетона с требуемой пористостью необходим повышенный расход алюминиевой пудры. Например, при температуре 4°С расход алюминиевой пудры на 1 м<sup>3</sup> бетона вдвое больше, чем при 21°С. Регулируя температуру воды затворения, можно управлять скоростью процесса газовыделения, т. е. скоростью вспучивания газобетонной массы и получением бетона с заданной объемной массой.

Для исследования влияния температуры воды затворения на изменение пористости бетона, прочности при сжатии, объемной массы и усадки газозолошлакобетона были изготовлены образцы с температурой воды затворения 30, 40, 50°С и расходом алюминиевой пудры в 400, 500 и 600 г на 1 м<sup>3</sup> бетона.

Результаты исследований представлены в табл. 20 и на рис. 21.

Таблица 20. Влияние температуры воды затворения и расхода алюминиевой пудры

Расход алюминиевой пудры в г на 1 м <sup>3</sup> бетона	Температура воды затворения, °С	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		Предел прочности при сжатии, МПа	Усадка при высушивании до постоянной влажности, мм/м	Полная влажность при высушивании насыщенных образцов, мм/м
		после термообработки	в сухом состоянии			
400	30	1000	850	2,5	1,3	2,5
	40	1030	880	5	1,2	2,4
	50	1040	890	7,5	1,2	2,4
500	30	970	820	4,4	1,3	3
	40	1010	860	5,8	1,3	2,8
	50	1060	910	8	1,2	2,6
600	30	890	820	4,5	1,5	2,6
	40	970	820	5	1,3	2,6
	50	1060	910	5,2	1,1	2,8

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы. С увеличением температуры воды затворения с 30 до 40—50°С при расходе пудры в 400—500 г/м<sup>3</sup> прочность при сжатии увеличивается в 1,5—2 раза. Это, вероятно, объясняется ускорением твердения газобетона в период минимального влажностного градиента

ной температуре.

При расходе алюминиевой пудры 600 г на 1 м<sup>3</sup> этот эффект исчезает за счет бурного газовыделения, что приводит к формированию дефектной структуры бетона с неравномерным распределением разнородных пор.

В табл. 21 показаны результаты изучения характера пористости ячеистого бетона под бинокулярным микроскопом.

Как видно, изменение количества алюминиевой пудры и температуры воды приводит к появлению различий в пористости бетона.

Так повышение расхода пудры вызывает увеличение размера и количества пор и каверн, а также некоторое утоньшение перегородок между порами. В то же самое время применение подогретой воды (особенно до 50°С) позволяет уменьшить диаметр преобладающих пор и увеличить толщину перегородок.

Структура ячеистого бетона почти у всех образцов одинаковая — равномерно ячеистая. Выделяются два образца, имеющие искаженную дефектную структуру.

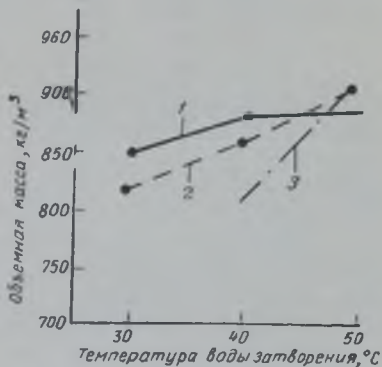
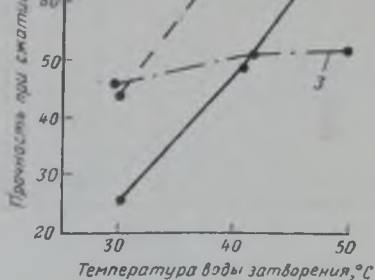


РИС. 21. ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И ОБЪЕМНОЙ МАССЫ ГАЗОШЛАКОБЕТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ ЗАТВОРЕНИЯ И РАСХОДА АЛЮМИНИЕВОЙ ПУДРЫ

1 — 400 г ПАК-3 на 1 м<sup>3</sup> бетона; 2 — 500 г ПАК-3 на 1 м<sup>3</sup> бетона; 3 — 600 г ПАК-3 на 1 м<sup>3</sup> бетона



Таблица 21. Пористость образцов бетона при разном расходе пудры и изменении температуры воды

Шифр образца	Характеристика исходной смеси			Особенности структуры			
	<i>В/Т</i>	расход пудры, г/м <sup>3</sup>	температура воды, °С	максимальный размер каверн, мм	размер пор, мм	преобладающий размер пор, мм	толщина перегородок, мм
А-400	0,55	400	30	1,5	0,15—0,5	0,2—0,3	0,1—0,2
	0,55	400	40	3	0,1—0,4	0,15—0,25	0,08—0,15
	0,55	400	50	2	0,1—0,4	0,15—0,3	0,08—0,15
А-500	0,55	500	30	2,5	0,1—0,6	0,2—0,3	0,08—0,2
	0,55	500	40	2	0,1—0,5	0,15—0,3	0,08—0,15
	0,55	500	50	2	0,1—0,35	0,15—0,25	0,07—0,15
А-600	0,55	600	30	4	0,2—0,8	0,2—0,35	0,1—0,2
	0,55	600	40	2	0,15—0,8	0,2—0,3	0,05—0,13
	0,55	600	50	6	0,05—0,7	0,07—0,2	0,05—0,1

Образец А-400, изготовленный на воде с температурой 30° С, характеризуется объединением пор в горизонтальных плоскостях с деформированными (перфорированными) перегородками. Поры правильные, круглые. Второй образец — А-600, также изготовленный на воде с температурой 30° С, имеет похожую расслоенную структуру, но отличается неправильной формой пор, плоских и вытянутых, длина которых обычно в 3—5 раз превышает высоту. При этом увеличиваются усадочные деформации и снижается прочность при сжатии в 1,5—2 раза по сравнению с газобетоном, изготовленным на воде при температуре 40 и 50° С.

Таким образом, характер образования пористой структуры оказывает влияние на ряд факторов — начальную вязкость, текучесть смеси, ее температуру, дисперсность пудры и ее количество, химический состав среды. Для удержания пузырька газа в материале необходимо, чтобы сила сопротивления среды была в 1,5 раза больше величины подъемной силы:  $F_2 > F_1$ . Из этого следует, что необходимо повышать пластическую прочность ячеистой массы в первый период ее формирования. Многочисленными исследованиями [39, 46, 58] доказано, что

одним из главных факторов, ускоряющих процессы газовыделения и схватывания ячеистобетонной массы, является повышение температуры среды.

На рис. 22 представлена кинетика роста температуры ячеистой смеси, приготовленной на шлаковом, зольном вяжущем, известково-песчаном 70:30 (известь:песок) и портландцементе.

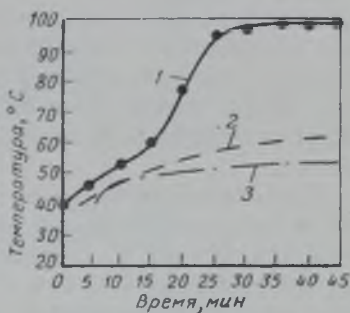


РИС. 22. КИНЕТИКА РОСТА ТЕМПЕРАТУРЫ ЯЧЕИСТОБЕТОННОЙ СМЕСИ, ПРИГОТОВЛЕННОЙ НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТКОВО-ПЕСЧАНОГО (1), ШЛАКОЗОЛЬНОГО ВЯЖУЩЕГО (2) И ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА (3)

Портландцемент характеризуется умеренной скоростью схватывания и относительно небольшим выделением тепла в первые сроки твердения (до 30—40 кал/г). Температура газобетонной смеси после заливки поднимается медленно и достигает максимума в пределах 50—60°С. Процесс формирования ячеистой структуры идет спокойно с умеренной скоростью. Иногда возникает необходимость ускорить схватывание, что достигается затворением горячей водой, подогревом шлама или введением в состав бетона молотой негашеной извести от 30 до 100 кг/м<sup>3</sup>. Более интенсивный процесс наблюдается при формировании ячеистой структуры в случае использования известково-зольных или шлаковых вяжущих. При использовании известково-цементного или известково-песчаного вяжущего образование пористой структуры идет бурно и часто трудноуправляемо. Максимальная температура в бетоне достигает 80—95°С, что приводит к общему ухудшению структуры за счет несовпадения процессов газовыделения и схватывания. Поэтому одной из важнейших задач в производстве ячеистого бетона является регулирование температуры ячеистой смеси в период гидратационного твердения вяжущих с таким расчетом, чтобы не допускать разогревания смеси бетона более 50—60°С.

Влияние количества воды затворения на свойства ячеистого бетона необходимо рассматривать в зависимости от ее температуры. По результатам исследований, представленным в табл. 27, можно сделать следующие выводы: с повышением температуры воды затворения с 30 до 80°С несколько повышается водотвердое отношение при одинаковой подвижности массы и ускоряются процессы твердения бетона. Использование воды с температурой более 60°С приводит к бурному газовыделению, что способствует возникновению дефектной структуры бетона с неравномерным распределением разнородных пор. Такая структура в крупноразмерных изделиях приводит к трещинообразованию уже в процессе твердения бетона.

Для ячеистых бетонов, изготовленных на основе шлаков и зол, оптимальной температурой воды затворения является 40—50°С. Эти условия обеспечивают получение золошлаковой массы с температурой 35—38°С, что обеспечивает образование бездефектной пористой структуры бетона с межпоровыми перегородками повышенной прочности. Таким образом, количество воды затворения и ее температура оказывают существенное влияние на капиллярно-пористую структуру бетона и его свойства.

## 5. ВЛИЯНИЕ ВОДОТВЕРДОГО ОТНОШЕНИЯ

Большое значение для прочностных, деформативных и других свойств газобетонов имеет относительное влажесодержание при той или иной форме связи воды в ячеистом бетоне. Газобетоны, изготовленные на шлакозольных вяжущих и заполнителях, являются капиллярно-пористыми телами, для которых характерны все виды связи воды: химическая, адсорбционная, осмотическая, физико-механическая.

Наличие большого количества химически не связываемой влаги, разность парциальных давлений пара внутри изделия и на его поверхности, а также градиент температуры вызывают направленную миграцию влаги из середины материала в поверхностные слои изделий. Испарение воды с поверхности ячеисто-бетонных панелей будет происходить интенсивно и в обычных условиях, если будет значительная разница в распределении влажности по сечению изделия.

Перепад влагосодержания и температуры в процессе твердения вызывает в изделии напряжения, отрицательно влияющие на еще несложившуюся, непрочную структуру газозолошлакобетона (см. гл. 3). Кроме того, большое начальное влагосодержание ячеистой массы снижает прочность и увеличивает конечную влажность изделий после их термообработки. Повышенная влажность в затвердевших изделиях приводит к значительным влажностным усадкам газозолошлакобетона и пониженной его трещиностойкости.

Влияние водотвердого отношения на прочность и деформативность газобетона исследовали на образцах-балочках размером  $4 \times 4 \times 16$  см и кубах размером  $10 \times 10 \times 10$  см. В этом случае газобетон изготовляли на основе вяжущих оптимальных составов из доменных, мартеновских, топливных шлаков, пылевидных зол Кураховской ТЭЦ и Назаровской ГРЭС, характеризующихся водопотребностью от 30 до 60%.

С целью определения характера пор и влияния их на влажность, прочность и усадку газобетона были изготовлены образцы с водотвердым отношением 0,5; 0,55; 0,6.

Результаты испытаний пропаренного газобетона приведены в табл. 22.

Исследования показали, что с увеличением  $V/T$  уменьшаются объемная масса бетона и прочностные показатели. В то же время увеличивается влажность бето-

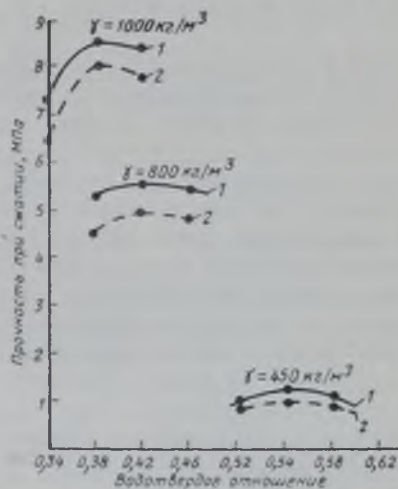


РИС. 23. ВЛИЯНИЕ ВОДОТВЕРДОГО ОТНОШЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ПРОПАРЕННОГО ГАЗОШЛАКОБЕТОНА

1 — на малоцементном шлаковом вяжущем состава: 70 : 10 : 15 : 5 (Ш : И : Ц : Г); 2 — на бесцементном шлаковом вяжущем состава: 75 : 20 : 5 (Ш : И : Г)

Таблица 22. Влияние  $V/T$  на свойства газобетона

Водотвердое отношение	Подвижность по Суттарду, см	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		Влажность, % по массе	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Полная влажностная усадка насыщенных образцов при высушивании до постоянной массы, мм/м
		после термической обработки	в сухом состоянии				
0,5	9	1200	820	42	4,5	1,4	2,1
0,55	10	1150	770	48	3,2	1,1	2,4
0,6	11	1050	720	47	2,9	1	2,8

на и ухудшаются его деформативные свойства (рис. 23). Выводы по результатам физико-механических исследований согласуются с петрографическим анализом структуры ячеистого бетона, изготовленного с аналогичными значениями водотвердого отношения (табл. 23). Ячеистый бетон, изготовленный при  $V/T=0,5$ , характеризуется максимальной прочностью. Поры сравнительно однородные, круглые, средний диаметр их 0,15; 0,3 мм,

Таблица 23. Пористость образцов бетона при  $V/T=0,5-0,6$ 

$V/T$	Максимальный размер каверн, мм	Размер пор, мм	Преобладающий размер пор, мм	Толщина перегородок, мм
0,5	3	0,1—0,7	0,15—0,3	0,05—0,15
0,55	3	0,1—0,6	0,2—0,3	0,08—0,19
0,6	2,5	0,1—0,7	0,2—0,4	0,1—0,2

Примечания: 1. Расход алюминиевой пудры 500 г на 1 м<sup>3</sup> бетона. 2. Температура воды затворения 80° С.

хотя и встречаются крупные каверны диаметром до 3 мм. Перегородки между порами имеют толщину от 0,05 до 0,15 мм. Материал перегородок плотен и имеет минимальную капиллярную пористость. Увеличение  $V/T$  до 0,55 приводит к небольшому утолщению и разрыхлению межпоровых перегородок. Однако пористость бетона при этом практически не изменяется. В структуре бетона наблюдаются признаки расслоения исходной смеси, заключающиеся в ориентированном в одной плоскости

расположении пор, вследствие чего величина перегородок указанной плоскости заметно меньше, чем в перпендикулярном к этой плоскости направлении. При  $V/T$ , равном 0,6, наблюдается максимальное разрыхление межпоровых перегородок за счет роста количества мелких пор и капилляров в цементирующем веществе. Поры несколько увеличиваются в размерах, но общая пористость изменяется незначительно. При этом величина усадочных деформаций для пропаренного газобетона возрастает на 20—25%.

Таким образом, уменьшение водотвердого отношения способствует уплотнению, а следовательно, и упрочнению перегородок между порами. Одновременно несколько увеличивается макропористость за счет снижения количества капиллярных пор и микропор (т. е. пор с размером менее 0,05 мм) [3].

В табл. 24 представлены результаты исследований по выявлению влияния водотвердого отношения на свойства газобетона объемной массой 700—730 кг/м<sup>3</sup>, изготовленного из шлаковых и зольных материалов при постоянном расходе алюминиевой пудры 500 г на 1 м<sup>3</sup> бетона.

Как было указано ранее, для получения газобетона требуемой объемной массы водотвердое отношение имеет первостепенное значение, а расход алюминиевой пудры свыше определенного предела для каждой объемной массы уже имеет меньшее значение, чем водотвердое отношение. В этом случае величина водотвердого отношения зависит от водопотребности сырьевых материалов и температура воды затворения. В данном случае для гозолобетона  $V/T$  составило 0,55 и 0,57, а для газошлакобетона  $V/T$  было в пределах 0,5—0,43. Увеличение водотвердого отношения способствовало удлинению сроков вспучивания и схватывания газозоломассы, так как оно сопровождалось уменьшением предельного напряжения сдвига и пластической прочности ячеистого бетона.

Кроме того, введение дополнительного количества воды привело к снижению прочности бетона, увеличению усадочных деформаций и конечной влажности газобетона. Опыты еще раз подтвердили, что при определенной температуре газобетонной массы (35—40° С), оптимальной величине водотвердого отношения и расхода алюминиевой пудры можно получить газобетон задан-

16 Таблица 24. Влияние водотвердого отношения на изменение влажности, прочности и усадочных деформаций газозолошлакобетона

Состав ячеистого бетона	В/Т	Влажность, %		Объемная масса в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа		Усадка, мм/м	
		пропаривание	запаривание		пропаривание	запаривание	пропаривание	запаривание
Доменный шлак 80% + 15% известь + 5% гипс и молотый песок 0,25 частей	0,43	31	23	710	4,8	5,5	1,8	1,1
Отвальный мартеновский шлак 85% + 10% известь + 5% гипс и молотый песок 0,25 частей	0,4	—	20	730	—	5,1	—	0,8
Топливный шлак 75% + 20% известь + 5% гипс и 50 кг портландцемента	0,4	35	25	720	4	4,9	1,9	1,2
Зола Кураховской ТЭЦ 70% + портландцемент 30%	0,55	45	29	690	3,5	4,4	2,4	1,6
Зола Назаровской ГРЭС 80% + 15% известь + 5% гипс и 75 кг портландцемента	0,57	43	31	700	3,8	4,7	2,2	1,5
Шлакопортландцемент 55% + топливный шлак + 40% портландцемент + 5% гипс	0,4	32	24	720	4,9	5,6	1,7	0,9

ной объемной массы с улучшенными прочностными и деформативными свойствами на основе зольных и шлаковых материалов.

## 6. СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ВОДЫ ЗАТВОРЕНИЯ

Как известно, изготовление ячеистых бетонов при пониженных водотвердых отношениях (0,25—0,35) оказывает весьма благоприятное влияние на свойства строительных изделий, в частности, способствуя значительному уменьшению усадочных деформаций при высыхании, что предопределяет повышение трещиностойкости ячеистого бетона. Кроме того, при производстве изделий из смесей с пониженным водотвердым отношением облегчается процесс сушки изделий и значительно сокращаются затраты на нее.

Снижение начального влагосодержания в ячеистой массе, как показали исследования [62, 64], может быть достигнуто дополнительной механической обработкой массы или введением в состав ячеистого бетона структурообразующих добавок [72]. И тот и другой способы позволяют снизить величину водотвердого отношения до 0,25—0,35 вместо 0,4—0,55, применяемых при обычном изготовлении газозолошлакобетона по литевой технологии.

В настоящее время механическая обработка газомассы осуществляется с помощью вибрации в процессе перемешивания смесей, вспучивания, вибрации после вспучивания и вибрации газомассы с пригрузом. Полученные бетоны характеризуются повышением прочности на 25—35% и снижением усадочных деформаций на 15—20%. Автором настоящей работы предложен, разработан и опробован в производственных условиях новый способ приготовления газомассы в процессе перемешивания сырьевых компонентов. Этот более простой способ получения подвижных удобоукладываемых смесей при пониженных водотвердых отношениях осуществляется в любом смесителе при удлиненных режимах перемешивания составляющих до окончания газовыделения.

Способ заключается в том, что смесь исходных материалов с тем или иным газообразователем и водой подвергается интенсивному перемешиванию в бетоно- или растворомешалках принудительного действия, на



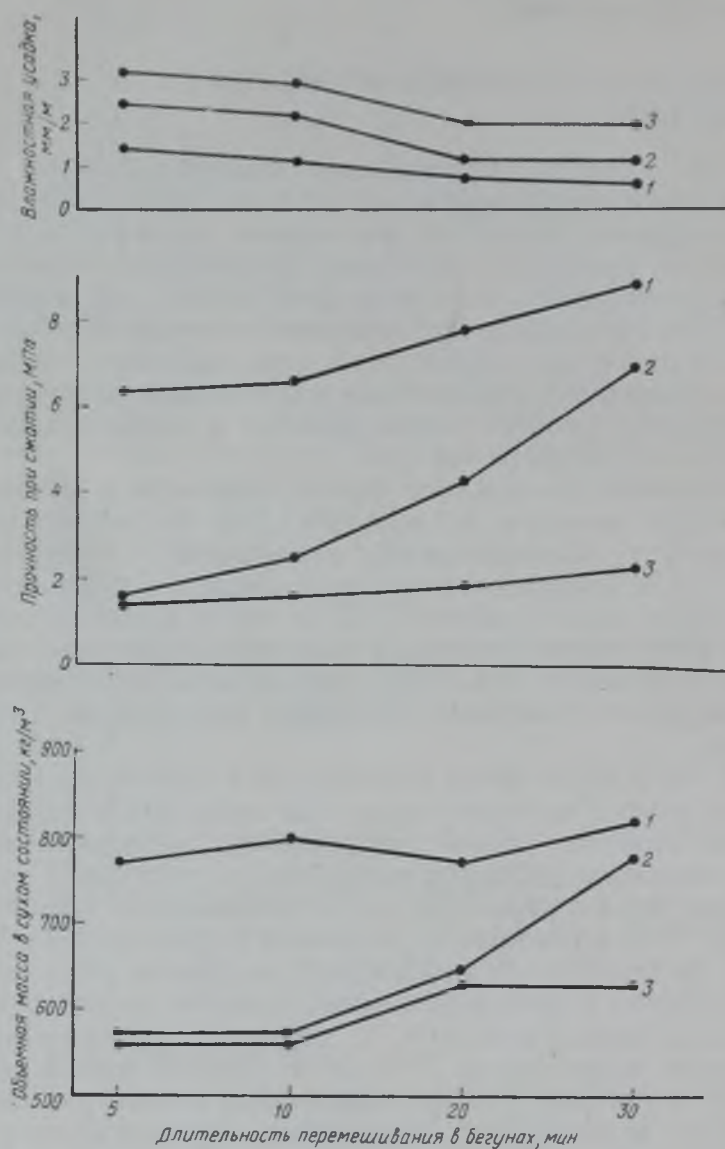


РИС. 24. ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГАЗОЗОЛОМАССЫ НА ИЗМЕНЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ МАССЫ, ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ, ВЛАЖНОСТНОЙ УСАДКИ ПРИ ЗНАЧЕНИЯХ В/Т ОТНОШЕНИЯ 0,3 (1); 0,4 (2); 0,5 (3). РАСХОД АЛЮМИНИЕВОЙ ПУДРЫ 700 Г НА 1 М<sup>3</sup> БЕТОНА

бегунах или подобных аппаратах в течение 10—15 мин и более, т. е. в процессе газовыделения. Такая механическая обработка смесей обеспечивает получение газомассы требуемой подвижности и удобоукладываемости при водотвердых отношениях до 0,35—0,25 и ниже за счет наличия газовых пузырьков в бетоне. При этом механическое воздействие на массу, как показывают исследования, создает мелкопористую структуру с диаметром пор не более 0,2—0,5 мм (рис. 24).

Оптимальная продолжительность механической обработки ячеисто-бетонных масс в смесителях принудительного действия зависит от свойства исходных материалов и, в частности, их дисперсности, величины принятого водотвердого отношения, температуры массы, количества газообразователя и других факторов. Время перемешивания легко устанавливается опытным путем. Наибольший эффект достигается при перемешивании массы в скоростных одно- и двухвальных вибромешалках.

Результаты исследований по выявлению влияния длительности перемешивания на дисперсность сырьевых материалов представлены в табл. 25.

При перемешивании тонкодисперсных шлаков и зол по удлиненному режиму в растворомешалке некоторое увеличение дисперсности отмечается только в присутствии воды. При длительной обработке шлака в сухом состоянии на бегунах возрастает его дисперсность на 2—3%, при введении воды до 40% дисперсность увеличивается на 5—10%. При этом отмечается после 20-минутной обработки высококальциевого шлака в бегунах появление свободной гидроксидной окиси кальция (рис. 25). Это свидетельствует об активизации шлака при истирании его в бегунах, что способствует получению ячеистого бетона повышенной прочности на его основе.

Однако наиболее целесообразным оказалось использование бегунов в подготовке сырьевой смеси для высококальциевых и сульфатсодержащих зол.

Как показали исследования, в таких золах кристаллики  $\text{CaO} + \text{MgO}$ ,  $\text{CaSO}_4$  покрыты оболочкой из стеклофазы различной толщины.

В зольных частицах, у которых толщина оболочек не превышает 1—3 мкм, стеклофаза гидролизуеться в первые часы водотепловой обработки, что способствует прониканию воды к кристаллам  $\text{CaO} + \text{MgO}$  и  $\text{CaSO}_4$  на

Т а б л и ц а 25. Влияние длительности перемешивания на дисперсность пылевидной высококальцевой золы и молотого доменного гранулированного шлака

Вид смесителя и время перемешивания, мин	В сухом состоянии			Во влажном состоянии при $B/T = 0,4$	
	удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{г}$	объемная масса, $\text{кг}/\text{м}^3$	содержание активных $\text{CaO} + \text{MgO}$ , %	удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{г}$	содержание свободной $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , %
1	2	3	4	5	6

Высококальцевая зола

<b>Растворомешалка</b>					
5	1970	1190	9	2000	11
10	1975	1200	9,4	1990	11
20	1970	1190	9,2	2010	11,2
30	1985	1190	9,6	2040	11,2
<b>Бегуны</b>					
5	2028	1280	9,5	2120	10,5
10	2075	1240	11,6	2180	11,7
20	2180	1290	12,3	2280	14,3

Высококальцевый шлак

<b>Растворомешалка</b>					
5	2100	1170	Нет	2050	Нет
20	2090	1190	»	2130	Следы
<b>Бегуны</b>					
5	2180	1190	»	2150	»
20	2220	2000	»	2370	5,1

периферии частицы. Увеличение объема этих кристалликов при гидратации вызывает растрескивание стекловидных оболочек и способствует вовлечению в процесс гидратации  $\text{CaO} + \text{MgO}$  и  $\text{CaSO}_4$ , заключенных во внутренних участках.

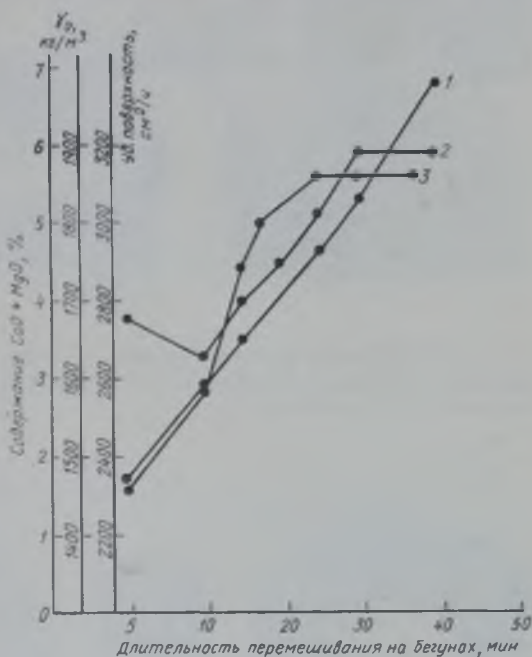
В крупных частицах золы оболочка стеклофазы достигает 5—10 мкм, что значительно замедляет процессы

ее гидратации и приводит к неравномерности изменения объема затвердевшего материала.

На рис. 26 представлены образцы из газобетона, изготовленного на рядовой высококальциевой золе без предварительной обработки. После запаривания и про-

РИС. 25. ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГАЗОЗОЛОМАССЫ НА ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ АКТИВНЫХ  $\text{CaO} + \text{MgO}$ , ОБЪЕМНОЙ МАССЫ, УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВОЙ ЗОЛЫ

1 — содержание  $\text{CaO} + \text{MgO}$ , %;  
2 — объемная масса газомассы,  $\text{кг/м}^3$ ; 3 — удельная поверхность,  $\text{см}^2/\text{г}$



паривания на образцах были глубокие и поверхностные трещины.

При длительном перемешивании высококальциевой золы в растворомешалке в течение 10—20 мин как в сухом состоянии, так и с водой ( $B/\Gamma=0,4$ ) повышения дисперсности ее не отмечалось. Обработка золы на бегунах в течение 20—30 мин способствует измельчению материала с увеличением дисперсности на 15—20% и повышением содержания свободных  $\text{CaO} + \text{MgO}$  с 10,5 до 14,3% и особенно при обработке с водой. Очевидно, в данном случае происходит разрушение стекловидной оболочки зольных частиц и дополнительное освобождение активных  $\text{CaO} + \text{MgO}$ . Последующее гашение их в процессе твердения газобетона снижает

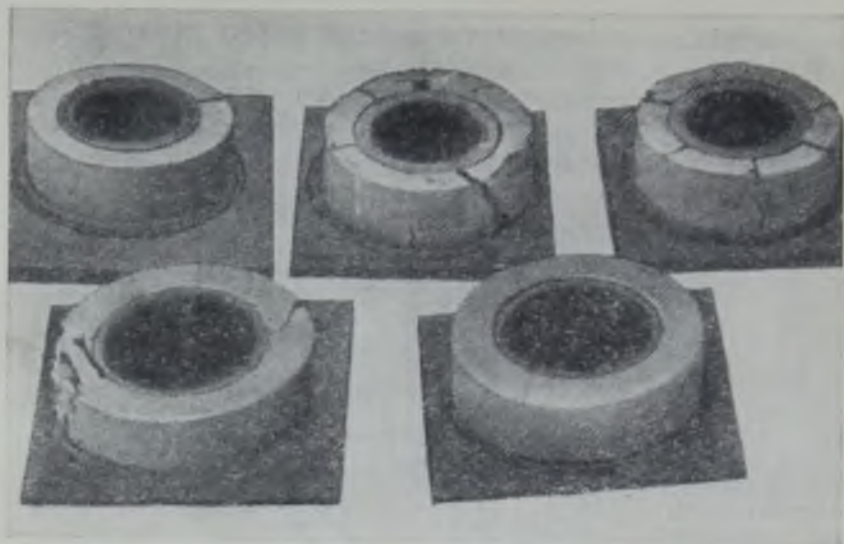


РИС. 26. ОБРАЗЦЫ ИЗ ГАЗОЗОЛОБЕТОНА НА РЯДОВОЙ ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВОЙ ЗОЛЕ БЕЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПОСЛЕ ПРОПАРИВАНИЯ И ЗАПАРИВАНИЯ

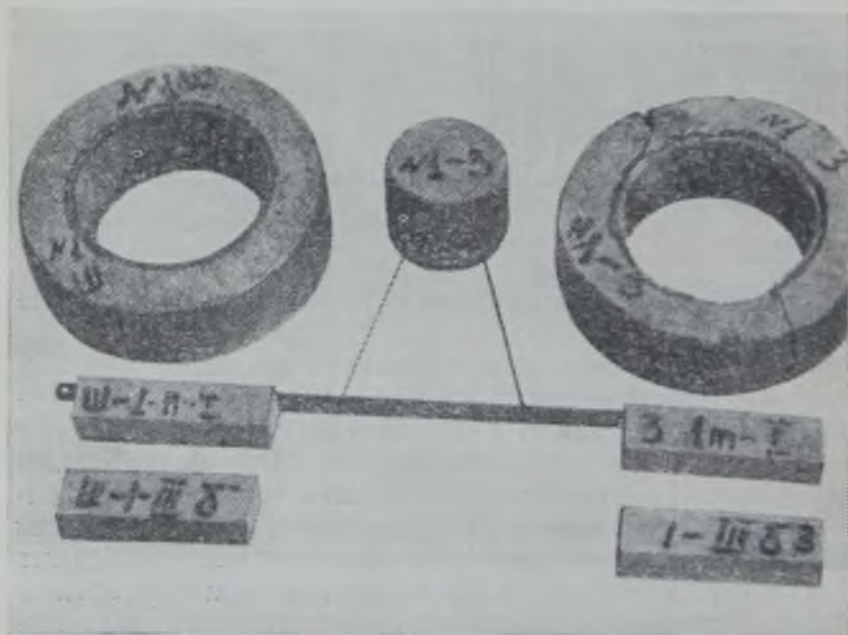


РИС. 27. ОБРАЗЦЫ ИЗ ЗАПАРЕННОГО ГАЗОЗОЛОБЕТОНА НА ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВОЙ ЗОЛЕ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГАЗОЗОЛОМАССЫ НА БЕГУНАХ В ТЕЧЕНИЕ 15 МИН

возможности трещинообразования за счет ликвидации неравномерного изменения объема золы (рис. 27).

Эффективность длительного перемешивания возрастает по мере перехода от взаимного истирания частиц (в растворомешалке) к интенсивному механическому разрушению поверхностной стекловидной пленки (обра-

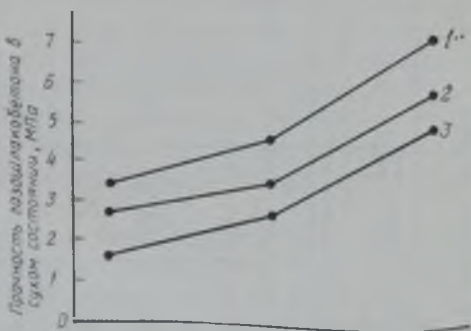
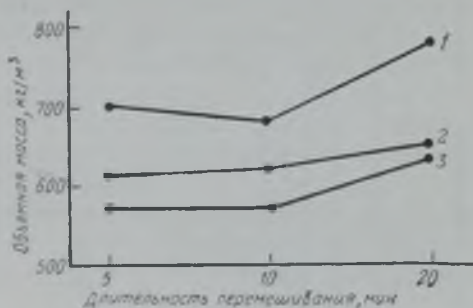


РИС. 28. ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА АЛЮМИНИЕВОЙ ПУДРЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ МАССЫ И ПРОЧНОСТИ ГАЗОШЛАКОВЕТОНА

1 — расход алюминиевой пудры 500 г/м³;  
2 — то же, 600 г/м³;  
3 — то же, 700 г/м³



ботка в бегунах). Это обеспечивает как небольшой прирост удельной поверхности золы, так и существенное растрескивание капель и пленок стеклофазы с вовлечением в последующий процесс гидратации кристалликов  $\text{CaO} + \text{MgO}$  и  $\text{CaSO}_4$  внутренних зон частиц золы. Таким образом, обработка смеси на бегунах является простым технологическим приемом дополнительной обработки золы и может быть рекомендована для практического внедрения при производстве газозолобетона на золах с повышенным содержанием свободных  $\text{CaO} + \text{MgO}$  и  $\text{CaSO}_4$ .

В табл. 26 и на рис. 28 показаны результаты исследований по определению влияния количества алюми-

Т а б л и ц а 26. Влияние количества алюминиевой пудры на некоторые свойства газомассы и затвердевшего газозолошлакобетона при длительном перемешивании смеси на бегунах

Свойства газомассы (затворенной водой при 50° С, $B/T=0,4$ ) и пропаренного газобетона	Время перемешивания, мин								
	5			10			20		
	Расход алюминиевой пудры, г/м <sup>3</sup>								
	500	600	700	500	600	700	500	600	700
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расплав лепешки, см	9,5	15	11	10,5	14,5	11	12	12	13
Объемная масса газомассы, кг/м <sup>3</sup>	1670	1540	1490	1760	1530	1410	1920	1880	1650
Объемная масса затвердевшего газозолобетона в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	1000	820	742	980	840	742	1150	900	862
Прочность при сжатии газозолобетона в сухом состоянии, МПа	4,8	3,8	2,6	5,9	4,5	3,8	8	6,5	5,3
Прочность при сжатии газошлакобетона в сухом состоянии, МПа	5,7	4,3	3,5	6,3	5,1	4,4	8,9	7,2	6
Водопоглощение, % по массе	40	44	55	37	40	48	33	32	36

ниевой пудры на некоторые свойства газомассы, подвергнутой длительному перемешиванию на бегунах и в растворомешалке.

Отмечается, что подвижность газомассы, определенная на приборе Суттарда, в зависимости от времени перемешивания и количества алюминиевой пудры возрастает; объемная масса газомассы при постоянном расходе алюминиевой пудры также несколько возрастает с увеличением времени перемешивания вследствие увеличения количества твердой фазы в единице объема.

Большое влияние на подвижность и объемную массу газомассы оказывает температура воды затворения и величина водотвердого отношения, о чем свидетельствуют данные табл. 27 и рис. 29.

При двадцатиминутном перемешивании и при повышении температуры воды затворения с 20 до 80° С уменьшается подвижность массы с 15 до 66 см (по Суттарду) и увеличивается ее объемная масса с 1640 до 1820 кг/м<sup>3</sup>; при пятиминутном перемешивании объемная масса газомассы уменьшается с 1870 до 1540 кг/м<sup>3</sup>. С уменьшением водотвердого отношения от 0,5 до 0,25 найденные закономерности сохраняются. При длительном перемешивании в бегунах и с уменьшением  $B/T$  увеличиваются и прочностные характеристики ячеистого бетона на 50—70% за счет повышения дисперсности шлаков и зол и их активизации.

Аналогичные зависимости были получены для газобетона, приготовленного в растворомешалке. Однако прирост прочности газобетона был ниже, в пределах 25—35%.

Основные свойства газозолошлакобетона, полученные при длительном перемешивании газомассы, представлены в табл. 28. Как показано в табл. 28 и на рис. 30, объемная масса газобетона зависит от количества алюминиевой пудры и длительности перемешивания.

Минимальную объемную массу газобетона в пределах 750—900 кг/м<sup>3</sup> при перемешивании в течение 20 мин можно получить при расходе ПАК-3 в 700 г/м<sup>3</sup> вместо 500 г/м<sup>3</sup> при перемешивании в течение 5 мин. Увеличение времени перемешивания приводит к увеличению прочности газобетона на 15—20% при постоянной объемной массе.

При возрастании объемной массы на 20—30% прочность возрастает в 1,5—2 раза.



Таблица 27. Влияние температуры воды затворения на свойства газомассы и пропаренного газозолобетона при различных значениях водотвердого отношения

Время перемешивания в бегунах, мин	$B/T=0,45$						$B/T=0,35$					
	диаметр расплыва лепешки, см	объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		влажность после пропаривания, %	газозолобетон в сухом состоянии		диаметр расплыва лепешки, см	объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		влажность после пропаривания, %	газозолобетон в сухом состоянии	
		газомассы	пропаренного газозолобетона		объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	прочность при сжатии, МПа		газомассы	пропаренного газозолобетона		объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	прочность при сжатии, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Температура воды 20°С

5	20	1870	1020	23,4	820	12	13	1870	1000	19	840	2,5
10	22	1810	900	21,6	740	14	13	1650	1040	15,5	900	4
20	15	1640	860	16,2	740	17	10	1600	1150	18,5	970	6,6
30	12	1670	910	13,7	800	24	10	1800	1280	21,8	1050	9

Температура воды 30°С

5	—	1880	1110	24,7	890	31	8	1700	1110	27,6	870	3,6
20	13	1760	985	23,1	800	26	7	1680	1110	28,1	875	6

Температура воды 40° С

5 20	12	1560	985	23,1	800	25	9	1770	1090	19,2	915	5
	9	1660	1180	20,4	980	38	7	1780	1275	15,9	1100	9

Температура воды 50° С

5 20	12	1490	918	24	740	26	8	1780	1190	29,4	920	4,8
	10	1650	1130	27	890	44	7	1750	1160	27,5	910	5,9

Температура воды 60° С

5 20	9	1620	860	16,2	740	19	7	1540	1120	22,2	917	4,9
	10	1740	1470	33,6	1100	63	6	1800	1260	20	1050	50

Температура воды 80° С

5 20	8	1540	1090	32,2	900	38	6	1570	1020	13,3	900	5,6
	6	1820	1350	8,9	1240	100	6	1760	1300	11,1	1170	11,5

$B/T=0,5$

Температура воды 95° С

5 20	8	1490	1060	26,2	840	32	12	1220	—	—	600	1,7
	6	1800	1300	11,1	1170	90	10	1370	—	—	900	3,6

$B/T=0,4$

$B/T=0,3$

Температура воды 20° С

5 20	11	1850	1125	28	880	37	10	1890	—	—	820	3,2
	8	1675	1110	22,6	905	48	7	1830	—	—	847	4

Т а б л и ц а 28. Влияние Длительности перемешивания формовочной шени на свойства пропаренного газозолошлакобетона

		Без алюминиевой пудры																			
		после пропаривания в сухом состоянии																			
1	Время перемешивания, мин	2	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	3	влажность, % по массе	4	объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	5	прочность при сжатии, МПа	6	объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	7	прочность при сжатии, МПа	8	прочность при изгибе, МПа	9	водопоглощение, % по массе	10	усадка после пропаривания, мм/м	11	полная влажностная усадка, мм/м

$V/T=0,5$

5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	1880	29	1770	—	1400	16	1770	—	4	30	1,6	—	2,6	—	—	—	—	—	—	—	—
20	1870	26	1740	—	1390	17,6	1740	—	4,8	31	0,98	—	1,64	—	—	—	—	—	—	—	—
30	1890	27	1720	—	1320	18	1720	—	4,4	25	0,88	—	1,5	—	—	—	—	—	—	—	—

$V/T=0,4$

5	2030	25	1880	—	1500	16,4	1880	—	5,4	22	0,95	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—
10	2000	27	1830	—	1450	20	1830	—	5,8	21	0,9	—	1,68	—	—	—	—	—	—	—	—
20	1990	24	1830	—	1560	22,2	1830	—	6,4	20	0,82	—	1,15	—	—	—	—	—	—	—	—
30	1910	25	1840	—	1630	24,4	1840	—	6,8	20	0,75	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—

$V/T=0,3$

5	1970	20	1850	—	1550	21	1850	—	6,4	13	1,05	—	1,33	—	—	—	—	—	—	—	—
10	2060	18	1900	—	1660	22	1900	—	7,6	11	0,84	—	1,25	—	—	—	—	—	—	—	—
20	2000	15	1870	—	1640	24,5	1870	—	7,1	12	0,63	—	1,21	—	—	—	—	—	—	—	—
30	2070	13	1855	—	1640	27,5	1855	—	7,2	12	0,8	—	0,92	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечания: 1. Составы вчестных бетонов назначались в со-  
 ную прочность при сжатии при прочих равных условиях: а) для вы-  
 : извесь: типс); 6) сверхкислых гранулированных шлаков 75:20:5  
 в) для пылевидных зол: 1) высококальциевых 80:15:5; 2) сверх-  
 дль 75 кг портландцемента на 1 м<sup>3</sup> бетона.

2. Режим пропаривания при 95°С 2+10+2 ч.

смеси при различных величинах водотвердого отно-

С алюминиевой пудрой в количестве 700 г на 1 м<sup>3</sup> бетона

Объемная масса газомассы, кг/м <sup>3</sup>	после пропаривания в сухом состоянии							водопоглощение, % по массе	усадка после пропаривания, мм/м	полная влажностная усадка, мм/м
	влажность, % по массе	объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	прочность при сжатии, МПа	прочность при изгибе, МПа	объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	прочность при сжатии, МПа	прочность при изгибе, МПа			
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

$B/T=0,5$

1620	25	960	2,2	—	720	2,7	0,8	52	2,05	2,84
1550	24	1000	3,5	—	860	3,9	1	50	1,9	2,61
1400	26	1080	3,9	—	800	4,2	1,2	48	1,73	2,35

$B/T=0,4$

1490	25	918	2,2	0,6	762	3,9	1,1	50	2,01	2,53
1410	25	918	3,2	0,6	772	4,5	1,3	51	1,66	2,06
1650	27	1132	4,4	1,1	892	5,8	1,7	36	1,32	1,71
1780	20	1366	6,7	1,8	1150	8,8	3,2	33	1,05	1,38

$B/T=0,3$

1756	20	1350	6,8	2	1140	8,4	2,4	40	1,04	1,64
1760	18	1445	7,4	1,8	1200	9,5	2,8	34	0,82	1,56
1770	16	1333	8,2	2,3	1140	11,5	3,8	35	0,43	1,09
1765	15	1438	12	2,8	1240	15	5,4	28	0,41	0,98

ответствии с активностью шлаков и зол, обеспечивающих максималь-соко- и среднекальциевых гранулированных шлаков 80 : 15 : 5 (шлак : (шлак : известь : гипс) + 50 кг портландцемента на 1 м<sup>3</sup> бетона; кислых 60 : 35 : 5 (зола : известь : гипс). В 1-й и 2-й составы вводи-

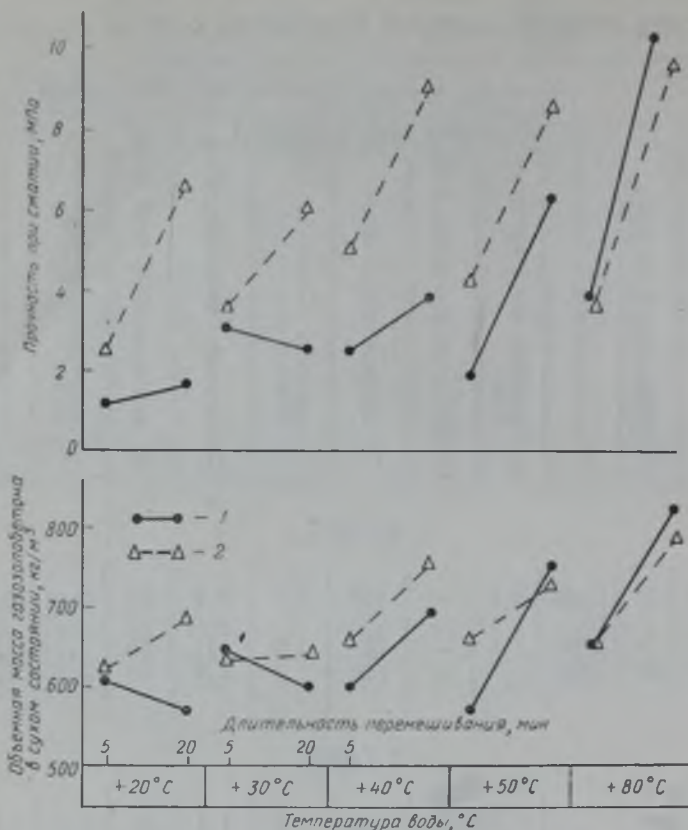


РИС. 29. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ ЗАТВОРЕНИЯ НА СВОЙСТВА ГАЗОШЛАКОБЕТОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЛИЧИНАХ ВОДОТВЕРДОГО ОТНОШЕНИЯ

1 —  $V/T=0,4$ ; 2 —  $V/T=0,35$

Объемная масса газобетона с повышением температуры воды затворения несколько возрастает вне зависимости от времени перемешивания, прочность также возрастает, особенно с увеличением длительности перемешивания.

Повышенная прочность газобетона была получена при пониженном водотвердом отношении — 0,3.

Значительное влияние длительное перемешивание оказывает на усадочные явления в газобетоне. Так, при  $V/T=0,5$  полная влажностная усадка газобетона с пяти-

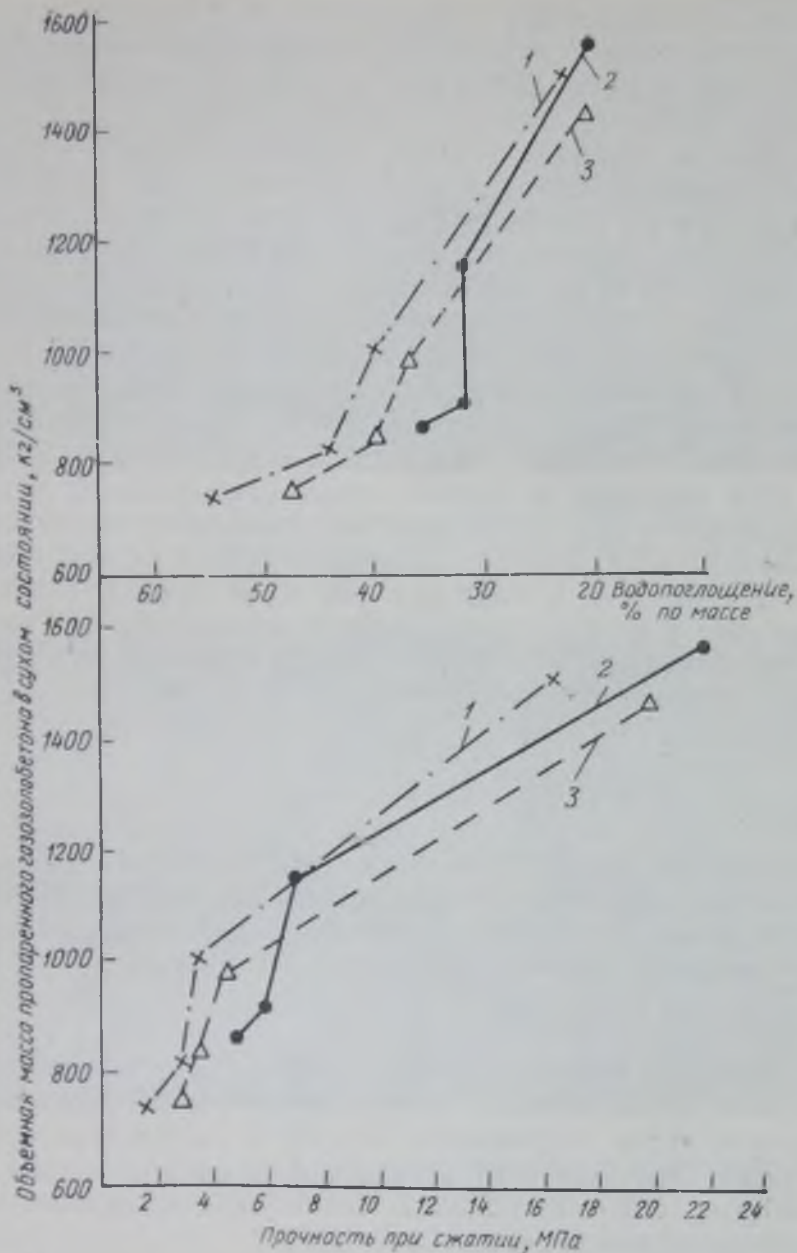


РИС. 30. ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГАЗОМАССЫ НА ИЗМЕНЕНИЕ СТЕПЕНИ ПОРИЗАЦИИ ГАЗОЗОЛОБЕТОНА И НА ЕГО ОБЪЕМНУЮ МАССУ И ПРОЧНОСТЬ ПРИ СЖАТИИ

1 — длительность перемешивания 5 мин; 2 — то же, 10 мин; 3 — то же, 20 мин

минутной обработкой массы составила 2,84 мм/м, с двадцатиминутной обработкой массы — 2,35 мм/м; при  $V/T=0,3$  усадка составила 1,64 и 0,98 мм/м соответственно.

При увеличении времени перемешивания с 5 до 20 мин прочность золобетона (без алюминиевой пудры) возрастает с 16 до 22 МПа. Рост прочности объясняется увеличением содержания активной  $\text{CaO}+\text{MgO}$  за счет измельчения и растрескивания частиц золы и повышением поверхности взаимодействия между  $\text{CaO}+\text{MgO}$  и алюмосиликатным стеклом. В результате этого возрастает количество продуктов твердения и плотность цементирующего вещества. Прочность шлакобетона увеличивается на 30—50%.

При введении в состав сырья алюминиевой пудры в количестве  $700 \text{ г/м}^3$  резко увеличивается пористость газомассы и снижается объемная масса газобетона в 1,5—2 раза, т.е. с  $1600$  до  $750 \text{ кг/м}^3$  (при  $V/T=0,4$ ). При этом в случае пятиминутного перемешивания прочность снизилась с 16 до 3,9 МПа, т.е. в четыре раза, а при двадцатиминутной обработке в бегунах прочность снизилась с 22 до 5,8 МПа, т.е. в три раза (см. рис.32). В данном случае сказывается тот факт, что при более длительном перемешивании газомассы образуется мелкопористая однородная структура, которая наряду с повышенной прочностью цементных перегородок и наличием преимущественно замкнутых пор предопределяет улучшенные прочностные, а также деформативные и другие характеристики газобетона.

Влияние длительного перемешивания может быть проиллюстрировано следующими описаниями микроструктуры ячеистого бетона. Бетон, полученный при обычном перемешивании в течение 3—5 мин и при температуре воды затворения 30—50°С, характеризуется неоднородной пористой структурой с резко различным размером пор — от 0,2 до 2 мм и неравномерным их распределением по сечению бетона.

Большая часть пор имеет неправильную форму и деформированные перегородки, рассеченные трещинами и кавернами. Изолированных пор практически нет.

Бетон, полученный при длительном перемешивании и температуре воды затворения 20°С, обладает мелкопористой структурой с размером пор 0,2—0,8 мм. Форма пор большей частью правильная — круглая или

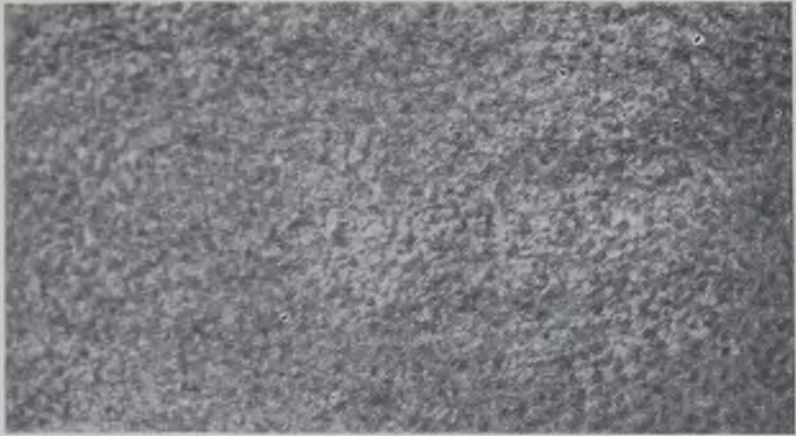


РИС. 31. МАКРОСТРУКТУРА ГАЗОШЛАКОБЕТОНА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ВОДЫ ЗАТВЕРЖЕНИЯ 18—20° С



РИС. 32. МАКРОСТРУКТУРА ГАЗОШЛАКОБЕТОНА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ВОДЫ ЗАТВЕРЖЕНИЯ 50° С

овальная, они разделяются довольно плотными, лишь иногда перфорированными перегородками и являются в основном изолированными (рис. 31).

Увеличение температуры воды затверения при длительном перемешивании до 50° С приводит к еще большему повышению однородности ячеистой структуры. В бетонах, полученных указанным способом, практи-



чески все поры приобретают правильную сферическую форму при минимальном колебании размеров (от 0,6 до 0,8 мм).

Преобладают замкнутые поры, что предопределяет пониженную гидроскопичность и водопоглощение бетона. Толщина перегородок между порами колеблется от 50 до 120 мкм, они сложены плотным и однородным камнем (рис. 32).

Мелкопористая структура ячеистого бетона и повышенная толщина и плотность межпоровых перегородок, возникающих в процессе длительного перемешивания, совпадающего с окончанием процесса газовыделения, обеспечивают получение бездефектной структуры ячеистой массы, не требующей срезки «горбушки». Без изменения величины объемной массы прочность возрастает на 50—70%, с увеличением объемной массы в полтора раза прочность увеличивается в два раза.

Таким образом, проведенные исследования позволяют рекомендовать длительное перемешивание газомассы в качестве технологического приема для получения газозолошлакобетона с улучшенными конструктивно-деформативными свойствами. На основе этих работ определены некоторые оптимальные параметры для практического применения этого способа в производственных условиях:  $V/T=0,35-0,3$ , температура воды затворения 40—50° С, температура газомассы 35—40° С, время перемешивания 15—20 мин, расход алюминиевой пудры должен быть увеличен на 60—80% по сравнению с литьевым способом при производстве ячеистобетонных изделий требуемой объемной массы.

С целью уменьшения водотвердого отношения и получения удобоукладываемых газобетонных смесей в СССР ряд исследователей (К. Э. Горяйнов, А. А. Крупин, М. И. Хигерович, А. П. Меркин, С. Н. Левин и другие [38, 62, 64]) разработали вибрационную технологию, при которой смешивание компонентов газобетона, вспучивание смесей и, наконец, формование изделий осуществляются с помощью вибрационных импульсов. Это дает возможность снизить водотвердое отношение при изготовлении газобетонных смесей от 0,4—0,5 до 0,3—0,35.

Метод вибровспучивания характеризуется тем, что после заливки массы в форму производится вибрация вспучиваемой массы. При этом ускоряется реакция гидратации вяжущего. При вибрировании зерна прихо-

дят в движение, отчего происходит разрушение диффузионного слоя, образуемого гасящейся известью, и обнажаются непогасившиеся поверхности. Сравнительно быстрее заканчивается процесс газовыделения и уменьшается водовяжущее отношение при быстро нарастающей структурной прочности массы. При этом происходит непрерывное перемещение газовых пузырьков без их последующего объединения, что обеспечивает мелкопористую структуру ячеистого бетона.

Таким образом, вибрация вызывает временное разжижение ячеистобетонной смеси, при этом определенное напряжение сдвига равно нулю, а величина пластической вязкости имеет минимальное значение. По окончании вибрации, вследствие значительного снижения водотвердого отношения и ускоренной гидратации вяжущего, время достижения максимальной температуры в бетоне при небольшом увеличении ее максимального значения сокращается в 1,5 раза, процесс нарастания пластической прочности ускоряется в 8—10 раз, а предельного напряжения сдвига в 15—18 раз по сравнению с ростом величины этих характеристик газозолошлакобетонных смесей, изготовленных литьевым способом.

Скорость процесса выделения газа, а следовательно, и скорость вспучивания ячеистобетонной смеси как результат химической реакции алюминия со щелочной средой зависят от температуры ячеистобетонной смеси. Для литьевого способа продолжительность газовыделения составляет 40—50 мин, а при комплексной вибрации сокращается в 5—10 раз, т. е. практически вспучивание бетона заканчивается через 3—8 мин. Кроме того, вибрирование бетона сокращает время вызревания газобетона в зависимости от состава до 45—60 мин вместо 4—6 ч при литьевой технологии.

Метод вибровспучивания позволяет также назначать более жесткие и укороченные режимы тепловой обработки без нарушения пористой структуры и снижения прочностных характеристик (рис. 33 и 34).

Автором были проведены исследования по выявлению влияния различных факторов на изготовление газобетона с применением вибрации смеси: а) выдержка ячеистой массы перед вибрацией; б) определение длительности вибрации. Частота колебаний была принята 3000 в 1 мин, амплитуда — 0,4 мм.

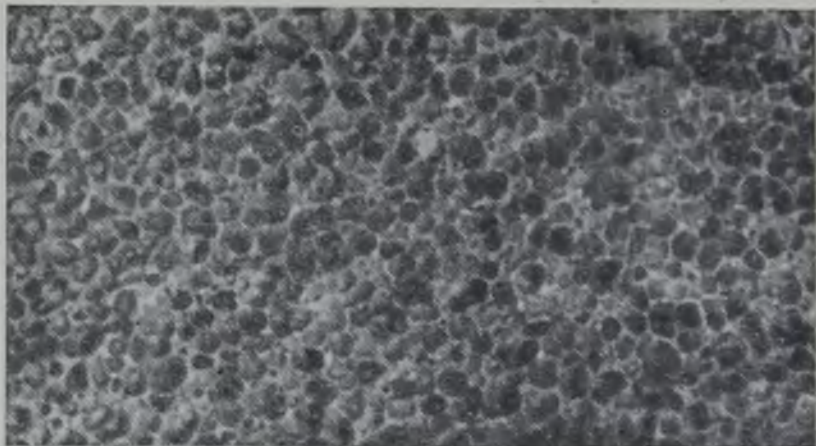


РИС. 33. МАКРОСТРУКТУРА ГАЗОШЛАКОБЕТОНА ОБЪЕМНОЙ МАССОЙ 750—770 кг/м<sup>3</sup>, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ВИБРОВСПУЧИВАНИЯ

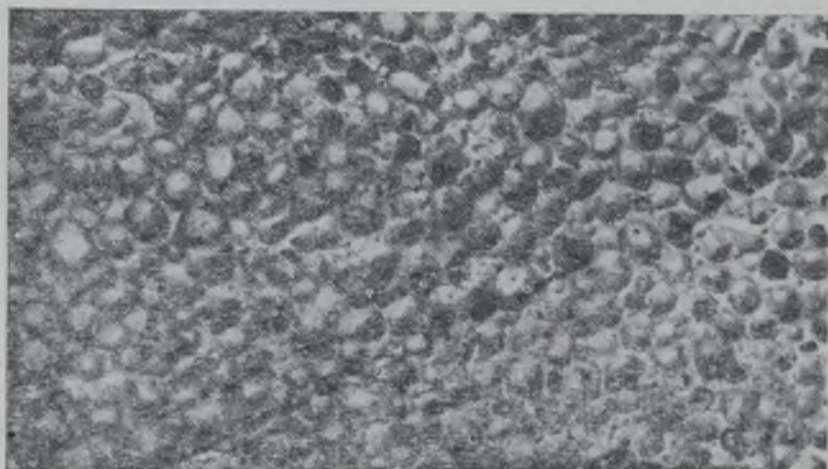


РИС. 34. МАКРОСТРУКТУРА ГАЗОШЛАКОБЕТОНА ОБЪЕМНОЙ МАССОЙ 550 КГ/М<sup>3</sup>, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ВИБРОВСПУЧИВАНИЯ

Ячеистую массу укладывали в форму без вибрации, с вибрацией сразу после заливки массы, с вибрацией, начинавшейся во время начала вспучивания массы, и с вибрацией через 5, 10, 15, 30 мин после заливки смеси в форму.

Результаты, представленные в табл. 28, показывают, что метод выбровспучивания способствует увеличению прочности при сжатии газобетона из доменного шлака

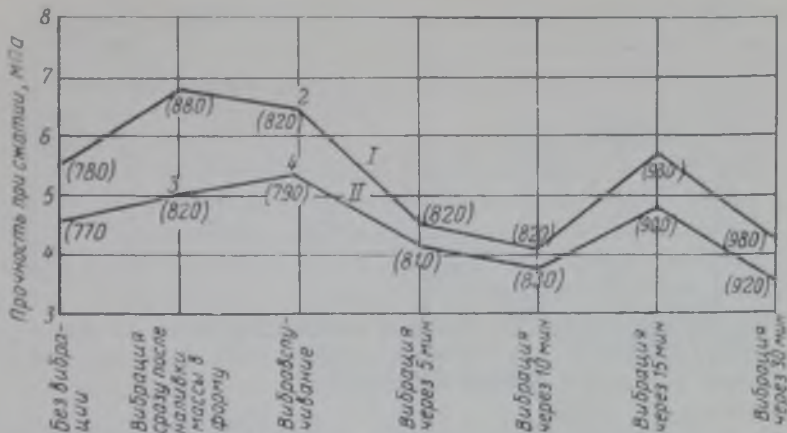


РИС. 35. ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫДЕРЖКИ ПЕРЕД ВИБРАЦИЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ И ОБЪЕМНУЮ МАССУ ГАЗОШЛАКОБЕТОНА

*I* — вяжущее из чушовского гранулированного доменного шлака состава Ш : И : Ц : Г = 70 : 10 : 15 : 5; точки *I* и *2* имеют  $V/T=0,41$ , остальные — 0,44; *II* — вяжущее из топливного гранулированного шлака состава Ш : И : П : Г = 70 : 10 : 15 : 5, точки *3*, *4* имеют  $V/T=0,42$ , остальные — 0,45. В скобках объемная масса, кг/м<sup>3</sup>

до 6,4 МПа при объемной массе 820 кг/м<sup>3</sup> с сокращением водотвердого отношения до 0,41, а на топливном шлаковом вяжущем до 5,3 МПа при объемной массе 790 кг/м<sup>3</sup> и  $V/T=0,42$ . При этом газшлакобетон, полученный без вибрации, показывает меньшую прочность на 10—15% по сравнению с прочностью вибровспученных бетонов.

Объемная масса вибровспученных бетонов незначительно выше объемной массы бетона, полученного без вибрации.

Вибрирование массы с повышенным водотвердым отношением (0,44—0,45) через 5, 10, 15 и 30 мин выдерживания после заливки в форму снижает прочность газобетона почти на 20—30% (рис. 35). Это объясняется тем, что за время выдерживания часть газа выделяется и бетон приобретает начальную структуру и прочность. Вибрация разрушает структуру. Через 30 мин процесс газовыделения почти заканчивается. В результате вибрации масса оседает и возникают внутренние трещины. Кроме того, проводились испытания влияния длительности вибрации на прочность и объемную массу газшлакобетона. Результаты испытаний показали, что вибрация с длительностью 10—60 с дает почти одинаковую прочность 5,9—6,6 МПа при колебании объемной

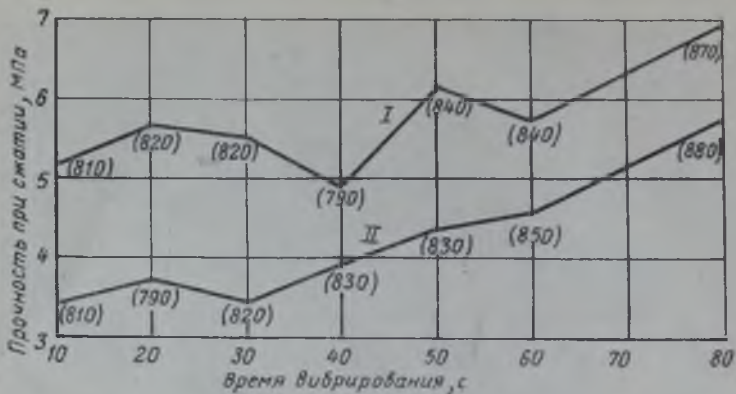


РИС. 36. ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВИБРАЦИИ НА ПРОЧНОСТЬ И ОБЪЕМНУЮ МАССУ ГАЗШЛАКОБЕТОНА

I — вяжущее из доменного гранулированного чугуновского шлака; II — вяжущее из топливного гранулированного шлака. В скобках объемная масса, кг/м³

массы 790 — 840 кг/м³ на Чусовском доменном шлаке и 5 — 5,7 МПа при объемной массе 790 — 850 кг/м³ на топливном гранулированном шлаке. Но при длительности вибрации 80 с объемная масса повышается до 880 кг/м³ (рис. 36).

Из этих опытов можно сделать вывод, что изготовление газшлакобетона путем вибровспучивания дает высокий технический эффект при длительности вибрации в пределах 10 — 50 с.

С целью получения газобетона пониженной объемной массы (менее 500 кг/м³) методом вибровспучивания при низком водотвердом отношении (0,3—0,35) необходимо увеличивать расход алюминиевой пудры на 30 — 40% и время вибрации.

По предложению К. Э. Горяйнова и других исследователей [38] формование бетона с улучшенной ячеистой структурой возможно осуществлять при создании дополнительной нагрузки на ячеистую смесь в период ее вспучивания.

Формование ячеистобетонных изделий под щитом-пригрузом обосновано использованием внутриспорового давления, возникающего за счет выделения водорода в процессе взаимодействия алюминия с гидратом окиси кальция. Эксперименты показали, что наибольший эффект дает укладка щита-пригруза на ячеистую смесь сразу после заливки ее в форму. После окончания вспу-

чивания массы щит-пригруз выдерживается на ее поверхности 5—20 мин в зависимости от сроков схватывания. Оптимальная величина давления щита-пригруза на смесь зависит от ее вязкости.

При литьевой технологии наилучшие результаты были получены при давлении 0,1—0,12 МПа, а при вибротехнологии эта величина составила 0,06—0,08 МПа.

Было установлено, что вспучивание смеси под щитом за счет более полного использования алюминиевой пудры предопределяет получение шлакозольного газобетона с пониженной объемной массой при одновременном увеличении прочности при сжатии на 15—20%. При этом газошлакобетон объемной массы 700 кг/м<sup>3</sup> имел прочность после пропаривания 5,9—6,3 МПа, а для объемной массы 450 кг/м<sup>3</sup> прочность составила 1,4—1,6 МПа, что соответствовало прочности запаренного газобетона, изготовленного по литьевой технологии.

## 7. ВВЕДЕНИЕ В ЯЧЕИСТЫЙ ШЛАКОЗОЛЬНЫЙ БЕТОН СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИХ ДОБАВОК

Исследованные технологические приемы по снижению водотвердого отношения (длительное перемешивание, комплексная виброактивизация смеси) повышают прочностные характеристики бетона, несколько уменьшают величину усадочных деформаций, однако полностью не устраняют трещинообразования в ячеистом бетоне.

Для снижения усадки в ячеистом бетоне и повышения трещиностойкости бетона, особенно неавтоклавного, ряд исследователей [72] предлагают вводить в бетон крупные заполнители (керамзит, шлаковую пемзу, аглопорит, доменный гранулированный шлак и т. п.). Другие же исследователи такое сочетание ячеистого бетона с заполнителем называют легким бетоном с поризованным цементным камнем.

Однако широкое внедрение этих бетонов и изделий из них в строительстве не осуществлено из-за недостаточной изученности их технологии и основных строительных свойств. Кроме того, при внедрении в производство этого вида бетона в каждом конкретном случае необходимо изучать характеристики местного сырья и технологические возможности данного производства.

С этой целью нами были проведены работы по получению шлакозольного ячеистого бетона с различными

видами заполнителей, которыми располагает строительная промышленность.

В работе были опробованы в качестве заполнителей рядовой песок, топливный и доменный гранулированный шлак, дробленый газозолобетон и для сравнения рядовой керамзит Лианозовского завода и др. [28, 38, 55, 67, 86].

Характеристика указанных материалов приведена в табл. 29.

В качестве вяжущих веществ использовали шлакопортландцемент из топливных гранулированных шлаков марки 300, бесклинкерное шлаковое вяжущее, изготовленное на основе топливного и доменного гранулированного шлаков, и зольное вяжущее.

Количество вводимых заполнителей с максимальным диаметром зерен 5 мм в опытах определялось экспериментальным путем с учетом получения объемной массы ячеистого бетона не более 700—800 и 900—1100 кг/м<sup>3</sup> в сухом состоянии.

Количество воды затворения бетона определялось распылом смеси на приборе Суттарда и составляло для

Т а б л и ц а 29. Свойства заполнителей

Заполнители	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	Водопоглощение, %
Рядовой шлак	1300—1500	—	—
Шлаковая пемза	600—1000	2—4	10—12
Топливный гранулированный шлак	1200—1350	1,5—2	10—12
Доменный гранулированный шлак	800—1000	0,2—1	8—12
Аглопоритовый щебень	600—800	0,8—1,2	10—15
Керамзит	500—600	5—6	12
Аглопоритовый гравий	600—900	3—4	12—14
Обжиговый зольный гравий	350—500—800	1—10	10—15
Дробленый газозолобетон	350—500	0,2—0,6	40—50
Безобжиговый зольный гравий	300	0,4—0,6	17—20
	500	0,8—1,5	15—17
	800	2,5—8	12—15
Рядовой песок	1380	—	—

вибровспученных бетонов от 8 до 10 см, для бетонов, формуемых обычным способом, — от 12 до 15 см.

Оптимальные составы ячеистых бетонов определяли соотношением величин усадочных деформаций и прочности при сжатии с усадкой и прочностью образцов, изготовленных из ячеистого бетона без крупного заполнителя. В табл. 30 приведены результаты указанных исследований.

В зависимости от вида и количества введенного заполнителя, его объемной массы и размеров зерен изменяется водотвердое отношение ячеистого бетона. Так, при асбестовом заполнителе это отношение находилось в пределах 0,49—0,51; при введении рядового и дробленого гранулированного шлака, рядового песка в количестве до 200—400 кг/м<sup>3</sup> водотвердое отношение составляло 0,3 и при использовании золы Ступинской ТЭЦ В/Т превышало 0,5.

Как показали ранее проведенные исследования, снижение водотвердого отношения оказывает большое влияние на уменьшение остаточной влажности в затвердевшем ячеистом бетоне. При введении заполнителя с плотной структурой увеличивается объемная масса на 15—20% и возрастает прочность при сжатии с 4,9 до 8,9 МПа для газозолобетона и с 5,3 до 9,5 МПа для газшлакобетона. При этом снижаются и усадочные деформации в 1,5—2 раза вследствие уменьшения водопотребности смеси и за счет создания структурного каркаса, являющегося основным скелетом в ячеистобетонной массе. Анализ результатов исследований свидетельствует о том, что оптимальным количеством введения крупного заполнителя с плотной структурой (с объемной массой более 1200—1300 кг/м<sup>3</sup>) является 30—35% (по массе). В этом случае для сохранения расчетной величины объемной массы шлакозольного ячеистого бетона необходимо увеличивать расход алюминиевой пудры на 20—30%.

При частичной замене тонкодисперсного заполнителя — молотого шлака, песка или золы крупным пористым заполнителем в количестве 20—25% (по объему) можно получать ячеистые бетоны с расчетной или пониженной объемной массой без изменения расхода алюминиевой пудры на 1 м<sup>3</sup> бетона. При этом также отмечается снижение водотвердого отношения, конечной влажности бетона и его усадочных деформаций на 50—70% (рис. 37).



Т а б л и ц а 30. Влияние структурообразующих добавок на прочность и деформативные изменения газозолошлакобетона

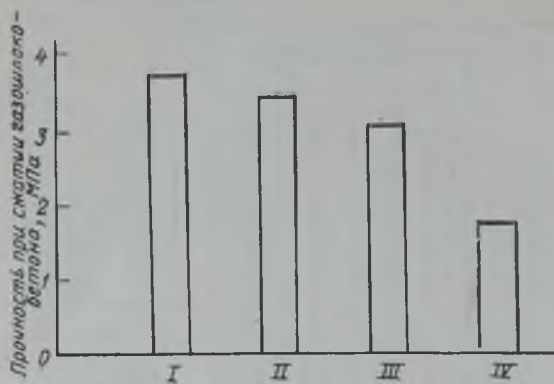
Структурообразующая добавка, % по массе	Объемная масса в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Влажность массы после пропаривания, %	Линейные деформации, мм/м		Изменение объема на приборе Ле Шателье, см	Трещинообразование на образцах-кольцах	Прочность при сжатии в сухом состоянии, МПа
			усадка насыщенных водой образцов	набухание			
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>I. Газозолобетон</b>							
Без крупного заполнителя, $V/T = 0,5$	850	32	2,7	2,3	3,5	Две глубокие трещины	4,9
Топливный гранулированный шлак — 20, $V/T = 0,3$	1050	26	1,8	1,5	2,1	Нет	6,8
Топливный гранулированный шлак — 30, $V/T = 0,28$	1020	25	1,4	1	1,8	»	7,5
Доменный гранулированный шлак — 30, $V/T = 0,3$	880	30	1,8	1,5	2,2	»	8
Рядовой песок — 30, $V/T = 0,33$	1150	22	1,6	1,2	2	Одна тонкая	5,1
Топливный гранулированный шлак — 30, $V/T = 0,3$	1100	23	1,6	1,3	1,9	Нет	7
Непрокаленная крошка газозолобетона — 20	810	30	2,1	1,8	2,9	Одна тонкая	4,6
Прокаленная крошка газозолобетона — 20	800	28	1,7	1,5	2,5	Нет	5
Топливный гранулированный шлак — 30 с вибро-вспучиванием	1180	19	0,8	0,6	1,9	»	8,9

Структурообразующая добавка, % по массе	Объемная масса в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Влажность массы после пропаривания, %	Линейные деформации, мм/м		Изменение объема на приборе Ле Шателье, см	Трещинообразование на образцах-кольцах	Прочность при сжатии в сухом состоянии, МПа
			усадка насыщенных водой образцов	набухание			
1	2	3	4	5	6	7	8
Керамзит — 20 (по объему)	800	23	1,3	0,9	2	Нет	7,5
<b>II. Газошлакобетон</b>							
Топливный гранулированный шлак — 30	1080	21	1,5	1,2	1,8	»	9,5
Асбест, VI сорт — 10	830	30	1,8	1,4	2	»	5,6
Шлаковая пемза — 20 (по объему)	950	25	1,5	1,2	2,1	»	6,9
Аглопоритовый щебень — 20 (по объему)	920	28	1,8	1,3	2,2	»	6,5
Аглопоритовый гравий — 20 (по объему)	820	24	1,3	1	2	»	7,2
Рядовой песок — 30	1150	19	1,5	1,1	1,9	»	5,3

Примечание. Максимальный размер зерен структурообразующей добавки составлял 5 мм.

Газошлакобетон, изготовленный с 10—15% асбеста и минеральной ваты, характеризовался повышением водотвердого отношения на 15—20%, послепропарочной влажности на 5—8% и снижением усадочных деформаций с 2,7 до 1,8 мм/м.

Армирование ячеистой структуры рассредоточенными волокнами асбеста и минеральной ваты способствует увеличению связности отдельных компонентов ячеистых



дуть крупности 1, 2; IV — немолотый песок, модуль крупности 2.  
Состав вяжущего: 75 : 20 : 5 (Ш : И : Г)

РИС. 37. ВЛИЯНИЕ КРУПНОСТИ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА НА ПРОЧНОСТЬ ГАЗОШЛАКОБЕТОНА ПРИ СОСТАВЕ 1 : 0,5 (ПО МАССЕ). ОБЪЕМНАЯ МАССА ГАЗОБЕТОНА 700 КГ/М<sup>3</sup>

I — молотый песок с удельной поверхностью 4100 см<sup>2</sup>/г; II — немолотый песок, модуль крупности 0,9; III — немолотый песок, мо-

дуль крупности 1, 2; IV — немолотый песок, модуль крупности 2.  
Состав вяжущего: 75 : 20 : 5 (Ш : И : Г)

бетон в области межпоровых перегородок, что увеличивает прочность при растяжении, т. е. сопротивляемость усадочным деформациям. Рассмотренные нами случаи улучшения прочностных и деформативных свойств газозолошлакобетона определяют эффективность введения в состав бетона до 20—25% (по объему) крупного пористого заполнителя — шлаковой пемзы, аглопорита, керамзита и др.

Однако в ряде районов страны отсутствуют легкие пористые заполнители или их экономически нецелесообразно использовать в качестве структурообразующей добавки в ячеистом бетоне из-за повышенной стоимости.

С целью изыскания новых возможностей автором совместно с сотрудниками кафедры МИСИ им. В. В. Куйбышева были проведены исследовательские работы, направленные на получение безобжигового искусственного заполнителя из различных тонкодисперсных материалов: пылевидных зол электростанций, мелких песков, известняковой муки и т. п.

Наиболее перспективным является изготовление безобжигового заполнителя в виде гравия из распространенных отходов электростанций — пылевидных зол. В данной работе использовали высококальциевые и сверхкислые золы различных электростанций.

Безобжиговый зольный гравий представляет собой материал, получаемый из золы и вяжущего (портландцемента, гипсоцементнопуццоланового) методом грану-

ляции, с последующим пропариванием или сушкой полученных гранул.

В табл. 31 и 32 представлены данные по свойствам  
Таблица 31. Оптимальные составы безобжигового гравия, изготовленного из пылевидных зол различного химического состава с применением портландцемента М300

Состав гравия, % по массе	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>					Прочность при сжатии, МПа	Водопоглощение (через 48 ч), %	Коэффициент размягчения
	зола	портландцемент	вода от массы сухих компонентов	после термообработки	в сухом состоянии			
Иркутской ТЭЦ 85	15	45	780	630	1095	3,4	30	0,94
			750	620	1080	1,8	32	0,9
Ступинской ТЭЦ 85	15	45	630	660	1150	3	32	0,96
			800	650	1130	1,6	34	0,87
Красноярской ТЭЦ 90	10	30	980	860	1510	6,5	23	0,95
			950	860	1490	1,5	25	0,9

Примечание. Гравий через 12 ч после изготовления подвергали термообработке в течение 2 ч.

Таблица 32. Оптимальные составы безобжигового зольного гравия, изготовленного из пылевидных зол различного химического состава с применением гипсоцементно-пуццоланового вяжущего

Состав зольного гравия, % по массе	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>					Пустотность, %	Прочность при сжатии, МПа	Водопоглощение, %	Коэффициент размягчения
	зола электростанций	портландцемент М 400	строительный гипс	вода от массы сухих компонентов	в сухом состоянии				
Иркутской ТЭЦ 65	5	30	42	600	1080	43	3,8	29	0,7
			43	670	1140	41	2,8	32	0,75
Красноярской ТЭЦ 65	5	30	30	820	1400	41	4	15	0,8

Примечание. Гравий после изготовления подвергали сушке при температуре 95—100° С в течение 2 ч.

безобжигового зольного гравия, изготовленного на основе портландцемента и гипсоцементнопуццоланового вяжущего.

Зольный гравий оптимального состава (85% золы и 15% портландцемента) имеет объемную массу после пропаривания 780—980 кг/м<sup>3</sup>, в сухом состоянии — 700—800 кг/м<sup>3</sup>. Водопоглощение составляет 20—27%. Добавка 0,2% СДБ снижает водопоглощение зольного гравия до 13—15%. Пропитанный петролатумом зольный гравий имеет более низкое водопоглощение (4—5%).

Гидрофобизированный зольный гравий может быть применен в качестве структурообразующей добавки в ячеистых бетонах с целью снижения влагосодержания и повышения трещиностойкости изделий.

Введение в газозолошлакобетон зольного гравия в количестве до 40% (по массе) снижает водотвердое отношение с 0,45 по 0,28. При этом прочность возрастает на 20—30%, объемная масса на 15—20%, снижается водопоглощение бетона до 26% и значительно уменьшаются как полные влажностные усадочные деформации (с 2,7 до 1,2 мм/м), так и усадка при высушивании образцов

**Т а б л и ц а 33.** Влияние количества зольного гравия в газозолобетоне на его строительные свойства

Количество зольного гравия в кг на 1 м <sup>3</sup> газозолобетона и в % от общей массы материалов	В/Т	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		Влажность после пропаривания (по массе), %	Прочность при сжатии, МПа		Водопоглощение, %	Коэффициент размягчения	Усадка, мм/м
		после пропаривания	после сушки до постоянной массы		после пропаривания	после сушки до постоянной массы			
Газозолобетон без гравия	0,5	1340	960	40	5	6,5	46	0,83	2,7
200 кг — 25	0,43	1340	1000	35	5,5	7,5	41	0,83	1,6
300 кг — 34	0,45	1350	920	35	5	6,5	39	0,87	1,3
400 кг — 45	0,37	1270	950	31	6,5	8	36	0,87	1,2

**П р и м е ч а н и е.** Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> газозолобетона без гравия (состав заводской): портландцемент — 270 кг, зола — 600 кг, известь — 12 кг, СаСl<sub>2</sub> — 4 кг, алюминиевая пудра ПАК-3 — 0,28 кг. Структурообразующая добавка — зольный гравий из золы и цемента (85% + 15%), влажность гравия 12—15%, усадка 1,2 мм/м.

сразу после тепловой обработки (табл. 33). С увеличением расхода алюминиевой пудры до 700—800 г/м<sup>3</sup> снижается объемная масса бетона до 900—880 кг/м<sup>3</sup>.

Получение ячеистого бетона объемной массой 700—800 кг/м<sup>3</sup> возможно при введении в состав его до 40% зольного гравия с пористой структурой, собственная объемная масса которого не превышает 400—500 кг/м<sup>3</sup> [28].

Усадочные деформации ячеистого золобетона с зольным гравием зависят не только от его количества, но от «собственной» его усадки.

Исследования показали, что при использовании зольного гравия с усадочными деформациями 1,2—1,3 мм/м усадка газозолобетона находилась в пределах 1,3—1,6 мм/м. В то же время газобетон, изготовленный с добавкой 40% высушенного гравия и имевшего «собственную» усадку 0,2—0,3 мм/м, характеризовался влажностной усадкой от 0,8 до 1,2 мм/м, что в 2,5—3 раза ниже усадки газобетона без структурного заполнителя.

Таким образом, исследования по выявлению технологических факторов на формирование ячеистой структуры шлаковых и зольных бетонов показали, что, изменяя составы вяжущих в зависимости от вида используемых шлаков и зол, их тонкость помола, вид и количество газообразователей, температуру воды затворения и ее количество, можно получать газобетон с заданными объемными массами при оптимальных прочностных и деформативных характеристиках. Существенная роль в процессе управления структурой и свойствами ячеистого бетона принадлежит величине водотвердого отношения, предопределяющей качественную характеристику микро- и макроструктуры в бетоне и конечную его влажность, что обуславливает изменение прочности и деформативности бетона во времени. Разработанные и внедренные методы по снижению водотвердого отношения при изготовлении газобетона, а также соблюдение оптимальных требований по другим технологическим факторам позволяют сделать вывод, что на основе различных видов шлаков и зол технически возможно получать ячеистые бетоны с оптимальными свойствами как при пропаривании при 90—95° С, так и при запаривании в автоклавах при 175° С, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным и теплоизоляционно-конструктивным ячеистым бетонам из традиционных материалов. При этом можно дифференцировать подход к изготовле-

Таблица 34. Влияние технологических приемов формирования ячеистой структуры на свойства газшлакозобетона объемной массой 700—750 кг/м<sup>3</sup>

1	2	3	4	Пропаривание при 95—98° С 3+10+3 ч		Запаривание при 175° С 2+8+2 ч	
				5	6	7	8
Вид шлаков и зол, состав вяжущих [шлак (зола) : известь : гипс]	Состав ячеистого бетона (вяжущее : заполнитель)	Технологические приемы формирования ячеистой структуры	V/T	прочность при сжатии в сухом состоянии, МПа	усадочные деформации, мм/м	прочность при сжатии в сухом состоянии, МПа	усадочные деформации, мм/м
Доменный гранулированный шлак Ждановского завода	1 : 0	Литьевой метод	0,56	4	2,6	5,5	0,8
	1 : 0	Длительное перемешивание 15 мин	0,32	5,2	1,8	5,8	0,6
	1 : 0	Вибровспучивание	0,31	5,4	1,9	6	0,7
80 : 10 : 5	1 : 0+30%-ный крупный пористый заполнитель	Длительное перемешивание 10 мин	0,3	5,3	1	5,9	0,5
Топливный гранулированный шлак Мироновской ГРЭС	1 : 0	Литьевой метод	0,55	3,5	2,7	4,6	0,9
	1 : 0	Длительное перемешивание 15 мин	0,31	4,5	1,9	5,4	0,7

75 : 20 : 5	1 : 0	Вибровспучивание	0,32	4,7	1,6	5,6	0,7
	1 : 0 + 50 кг портландце- мента	Вибровспучивание	0,32	5,2	1,7	5,9	0,8
	1 : 0 + 30% крупного за- полнителя + 50 кг порт- ландцемента	Длительное перемешивание	0,31	4,9	0,9	5,4	0,6
Пылевидная зола	1 : 0	Литьевой метод	0,62	3	2,9	3,8	1,2
Ступинской ТЭЦ 60 : 35 : 5	1 : 0	Вибровспучивание	0,42	4	2,2	4,7	0,9
	1 : 0 + 75 кг портланд- цемента на 1 м <sup>3</sup>	Вибровспучивание	0,43	4,5	2,3	5,4	1
	1 : 0 + 75 кг портланд- цемента на 1 м <sup>3</sup> + 30% крупного пористого за- полнителя	Длительное перемешивание	0,35	4,6	1,3	5,2	0,8
Пылевидная зола Иркутской ТЭЦ	1 : 0	Литьевой метод	0,58	4,2	2,7	5,1	1
	1 : 0	Вибровспучивание	0,4	4,9	2,1	5,8	0,9
60 : 35 портландце- мент : 5	1 : 0 + 30% крупного пористого заполнителя	Длительное перемешивание	0,33	4,9	1,2	5,7	0,7

Примечания: 1. При длительном перемешивании, с целью сохранения заданной объемной массы, расход ПАК-3 увеличивается на 30—50%.

2. С введением крупного заполнителя масса увеличивается на 15—20%.



нию равнозначных по свойствам пропаренных и запаренных ячеистых бетонов и выделить основные направления.

При назначении составов шлакозольных вяжущих:

1) усреднять влияние химического состава разнокальциевых шлаков и пылевидных зол введением в их состав оптимальных количеств активизаторов твердения — извести, гипса, портландцемента, а также активного кремнеземистого заполнителя — молотого шлака, песка и золы;

2) формировать структуру ячеистого бетона с использованием оптимальных технологических параметров для данных составов шлакозольных вяжущих и бетонов на их основе, обеспечивающих получение затвердевшего бетона требуемой объемной массы при повышенной прочности и трещиностойкости;

3) назначать оптимальный вид и режимы тепловой обработки в соответствии с гидравлической активностью шлакозольных вяжущих, шлаков и зол, применяемых в изготовлении ячеистого бетона, с целью повышения трещиностойкости и долговечности изделий.

В табл. 34 представлены разработанные технологические приемы на примере получения как пропаренных, так и запаренных шлакозольных ячеистых бетонов объемной массой 700—750 кг/м<sup>3</sup> из различных видов шлаков и зол.

При литьевом методе изготовления газозолошлакобетон имеет прочность, удовлетворяющую требованиям ГОСТ только после запаривания бетона в автоклаве. При пропаривании прочность при сжатии снижается на 20—25% против запаривания. В случае использования прогрессивных методов в изготовлении ячеистого бетона — вибровспучивание, длительное перемешивание, прочность пропаренных приближается к прочности запаренных бетонов, изготовленных литьевым методом. При вибровспучивании прочность запаренных газобетонов возрастает на 20—30%.

### **ГЛАВА III. СПОСОБЫ УСКОРЕНИЯ ТВЕРДЕНИЯ ЯЧЕИСТОГО ШЛАКОЗОЛЬНОГО БЕТОНА И ВЛИЯНИЕ ИХ НА ЕГО СВОЙСТВА**

Тепловая обработка является одной из составных частей — III этапом — технологического процесса в изготовлении шлакозольного ячеистого бетона. Процесс твер-

дения в производстве изделий занимает до 90% времени и в значительной мере определяет строительно-деформативные свойства готовых конструкций. Основное назначение тепловой обработки заключается в ускорении процесса твердения шлакозольных материалов, которое способствует возникновению цементирующих новообразований в шлакозольных вяжущих, практически мало способных к самостоятельному твердению в обычных условиях. Тепловая обработка ячеистых бетонов из шлаков и зол является завершающим этапом технологического процесса производства изделий из них. Поэтому определение вида тепловой обработки, а также назначение режимов — важная технико-экономическая задача, целью которой является сокращение производственного цикла, повышение физико-механических показателей ячеистобетонных изделий при использовании широко распространенных дешевых побочных продуктов металлургической, энергетической и химической промышленности — гранулированных шлаков и пылевидных зол.

Положительное решение этой задачи сулит государству определенные выгоды и предоставляет большие возможности в получении значительного экономического эффекта.

#### 1. ТЕПЛОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ШЛАКОЗОЛЬНЫХ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ ПРИ ПРОПАРИВАНИИ (90—95°С) И ЗАПАРИВАНИИ (175°С И ВЫШЕ)

В настоящее время обработка бетонных изделий осуществляется тремя методами: в пропарочных камерах при атмосферном давлении (температура 70—100°С), в автоклавах при повышенном давлении и температуре 175°С и выше и с помощью электрического тока — контактным методом или инфракрасными лучами. Однако для бетонных изделий с ячеистой структурой предпочтение отдают автоклавной обработке [19, 57, 60, 70, 85].

При этом считается, что автоклавная обработка бетона обладает рядом преимуществ по сравнению с обработкой в пропарочных камерах или электротокком.

А. В. Волженский, К. Э. Горяйнов, С. А. Миронов, А. В. Саталкин и др. выделяют следующие преимущества автоклавного метода:

1) при заданной прочности бетона автоклавная об-

работка позволяет сократить расход цемента на 30—50% и использовать низкотемпературные вяжущие;

2) имеется возможность широко использовать различное местное сырье (шлаки, золы, пески), частично или полностью заменив ими цемент;

3) технология изготовления изделий не усложняется, а срок тепловлажностной обработки значительно сокращается — до 10—12 ч;

4) морозостойкость и трещиностойкость бетона при запаривании в автоклаве повышаются.

В то же время к недостаткам пропаренных бетонов исследователи относят:

1) большой расход пара, достигающий в камерах ямного типа 0,8—1 т на 1 м<sup>3</sup> бетона;

2) разность температур по высоте камер до 15—20° С на 1 м высоты;

3) пропаренные бетоны имеют пониженную прочность, повышенную деформативность и конечную влажность (до 30—40%).

Несмотря на принципиальное отличие условий тепловлажностной обработки бетонов в пропарочных камерах и в автоклавах (при атмосферном давлении и при повышенном) и в том и в другом случае можно цикл обработки разделить на три периода:

1) нагрев бетона до температуры греющей среды;

2) выдержка при максимальной температуре (изотермический прогрев);

3) охлаждение.

Эти периоды твердения бетона в тепловлажностных условиях сопровождаются сложным комплексом физико-химических процессов, которые определяют фазовый состав новообразований и микроструктуру цементирующего вещества межпоровых перегородок ячеистого бетона. В то же время при подъеме и снижении температуры в пропарочных камерах и автоклавах протекают физические процессы, сопровождающиеся деформативными изменениями вследствие образования градиентов температуры  $\Delta t$ , влагосодержания  $\Delta u$  и давлений  $\Delta p$ , возникающих по толщине изделий.

Градиенты способствуют развитию внутренних напряжений в теле бетона, которые приводят к деструкции изделий и, в случае превышения прочности при растяжении, к трещинообразованию, что снижает эффект ускорения твердения цементирующих веществ.

Повышенной чувствительностью к физическим явлениям обладают бетоны с ячеистой структурой, характеризующиеся пониженными прочностными показателями и низким коэффициентом теплопроводности по сравнению с плотными бетонами. Отрицательные свойства ячеистой структуры бетона проявляются в процессе ускоренного твердения при температуре 90—95° С и более заметно при 175° С и выше за счет интенсивного тепло- и массообмена между теплоносителем и бетоном по сечению изделия.

Так, в первый период тепловлажностной обработки при пропаривании температура среды  $t_c$ , поверхности бетона  $t_n$  и тела бетона  $t_b$  подчиняется зависимости  $t_c > t_n > t_b$ , где к концу этого периода будет  $t_c = t_b$ , т. е. при температуре 90—95° С. При запаривании равенство  $t_c = t_b$  будет справедливо для температуры 175° С или выше. Превышение температуры в 1,5—2 раза вызывает более интенсивный перенос температуры и влаги от поверхности в глубь изделия.

Для предотвращения послойных деструктивных процессов необходима достаточная прочность бетона при данном оптимальном режиме подъема температуры до максимальной.

На первой стадии нагрева внешний теплообмен сопровождается интенсивной конденсацией пара на открытых поверхностях изделий, что приводит к некоторому доувлажнению бетона. Так, ячеистый бетон, нагретый до 100° С, увлажняется на 1,5—2%, а с повышением температуры до 175° С (в автоклаве) влагосодержание бетона повышается на 6—8% [65]. При этом, как показали исследования С. А. Миронова и др. [66], при повышении температуры ячеистые бетоны всех видов расширяются и величины набухания достигают максимума 1,7—2,1 мм/м. В последующем расширение бетона стабилизируется в период изотермической выдержки.

При изотермическом прогреве температура бетона начинает выравниваться, градиент температуры  $\Delta t$  стремится к нулю ( $\Delta t \rightarrow 0$ ), следовательно, поток влаги за счет  $\Delta t$ , направленный к центру изделия, также стремится к нулю ( $q_b \rightarrow 0$ ). Поры бетона заполняются влагой, и перепад влагосодержания между поверхностью и центром изделия уменьшается и тоже стремится к нулю ( $\Delta t \rightarrow 0$  и  $q_b \rightarrow 0$ ). Одновременно за счет выдавливания

воздуха из пор и замещения его влагой градиент давления  $\Delta p$  уменьшается, что снижает поток влаги  $q_T$  [69]. Этот период для формирования ячеистой структуры при пропаривании бетона является относительно спокойным со стороны физических процессов.

Однако ячеистая структура бетона автоклавного твердения вследствие повышенных градиентов  $\Delta t$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta p$  в период нагревания изделия до  $175^\circ\text{C}$  может быть подвергнута большим деструкциям за счет дополнительного увлажнения и расширения системы, чем пропаренный бетон. Решающая роль в этих изменениях принадлежит характеру цементирующего вещества, слагающего межпоровые перегородки бетона пористой структуры.

В изотермический период происходят дальнейшее взаимодействие компонентов бетона, накопление продуктов гидратации, их фазовые превращения. Возникшие в этих условиях гидратированные соединения определяют структуру затвердевшего вяжущего и его прочность. При этом, как известно, прочность запаренных материалов превышает прочность пропаренных при температуре  $90\text{--}95^\circ\text{C}$ .

Однако, как показали наши исследования, в случае использования шлакозольных вяжущих процесс твердения ячеистого бетона на их основе в пропарочных камерах можно интенсифицировать за счет повышения тонкости помола основных компонентов вяжущего и заполнителя бетона (шлаков и зол), введения в состав бетона до  $50\text{--}75\text{ кг}$  портландцемента на  $1\text{ м}^3$  бетона и получить равнопрочный малоклинкерный ячеистый бетон при пропаривании и бесклинкерный при запаривании при одной и той же объемной массе. Равнопрочный пропаренный бесклинкерный шлакозольный ячеистый бетон можно получить и при увеличении объемной массы на  $10\text{--}15\%$ .

Не последняя роль в получении ячеистого бетона с бездефектной микро- и макроструктурой принадлежит периоду охлаждения изделий. В период удаления пара температура поверхности бетона и ее влагосодержание начинают снижаться. Температура камеры —  $t_n$  (автоклава —  $t_a$ ) стремится к температуре окружающей среды  $t_c$ . В материале опять возникают градиенты  $\Delta t$  и  $\Delta u$  противоположного направления по отношению к процессам нагревания при максимальной температу-

ре. При этом возникает движение влаги к поверхности материала. При автоклавной обработке влага, находящаяся в порах и капиллярах бетона, оказывается перегретой и вскипает по всему объему изделия, т. е. происходит интенсивное испарение воды — до 7—8%. Образующиеся при испарении потоки пара перемещаются по порам и капиллярам ячеистой структуры бетона под действием разности давлений в бетоне и среде автоклава, что в случае недостаточной прочности цементирующего вещества приводит к нарушению структуры и образованию трещин.

Поэтому скорость сброса пара в автоклаве до получения в нем атмосферного давления является основным фактором, предопределяющим получение бездефектной структуры бетона. После снижения давления пара до атмосферного (до температуры 100° С) остывание идет спокойнее вследствие конвективного теплообмена со средой, а также частичного испарения влаги из бетона (до 3—5%). Этот процесс согласуется с периодом остывания изделий в пропарочных камерах.

Таким образом, тепловлажностные параметры при запаривании бетона в автоклаве не только активизируют физико-химические процессы взаимодействия между составляющими, что приводит к ускорению твердения, но и усугубляют физические процессы за счет увеличения кинетики тепло- и массообмена по сечению изделия [48].

Форсированный режим тепловлажностной обработки бетона способствует завершенности процессов твердения бетона и усадочных деформаций, о чем свидетельствуют отсутствие прироста прочности запаренных изделий и незначительные изменения усадочных деформаций во времени. В то же время твердение ячеистого бетона при высоких послонных градиентах  $\Delta t$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta p$ , как правило, сопровождается возникновением микродефектов в его структуре, не оказывающих существенного влияния на прочность при сжатии свежезатвердевшего бетона, но способствующие снижению морозостойкости и трещиностойкости изделий при их эксплуатации.

Для улучшения условий теплообмена ячеистого бетона с пониженной теплопроводностью исследователи предлагают устройство технологических пустот по сечению изделий, что уменьшает толщину прогрева и снижает величины послонного напряжения по сечению

изделия. При пропаривании ячеистого бетона процесс тепло- и массообмена при нагревании и охлаждении изделий идет при пониженных температурно-влажностных градиентах, что не влечет за собой деструкции в бетоне с ячеистой структурой. Кроме того, оптимальные составы шлакозольных вяжущих, добавка портландцемента в ячеистый бетон, пониженное водотвердое отношение способствуют получению цементирующего вещества повышенной прочности, обеспечивающей получение бездефектной микро- и макроструктуры бетона в процессе его твердения. В отличие от автоклавной обработки пропаривание бетонов не обеспечивает завершения процессов твердения вяжущего. Остаточная влажность ячеистых бетонов составляет 30—40% по массе в зависимости от вида используемых шлаков и зол, состава бетона, технологических приемов образования ячеистой структуры, величины объемной массы и т. п. Механически несвязанная вода заполняет капилляры, поры в межпоровых перегородках и макроструктуре бетона. Эта вода оказывает положительное влияние на продолжающиеся послепропарочные процессы гидратации неизрасходованных гидравлически активных компонентов вяжущих и бетонов, способствующих увеличению прочности через 28 сут воздушного хранения на 30—50%. В то же время конечная влажность указывает на незавершенность усадочных деформаций, которые развиваются во времени после пропаривания при высыхании бетона. В аналогичных процессах для бетонов с плотной структурой преобладающим является упрочнение цементного камня, а с ячеистой структурой влажностные усадки (свыше 1,5—2,5 мм/м) приводят к трещинообразованию в крупноразмерных изделиях при их эксплуатации.

Результаты наших исследований [35] свидетельствуют о возможности получения неавтоклавных шлакозольных ячеистобетонных изделий повышенной трещиностойкости за счет введения дополнительного послепропарочного процесса — сушки бетона, либо осуществления тепловой обработки в безпаровой среде методом контактного электропрогрева с укрытием водонепроницаемой пленкой или прогревом бетона инфракрасными лучами [2]. Для определения видов и режимов тепловлажностной и тепловой обработки нами исследовались ячеистые бетоны с различной объемной

Массой в 1000—800; 700—600; 500—400 кг/м<sup>3</sup>, изготовленные из разнокальциевых шлаков и зол с содержанием окиси кальция от 5—45%. Оптимальные составы вяжущих и бетонов, виды шлаков и зол назначались по степени гидравлической активности в соответствии с условиями твердения, предопределяющими получение низкоусадочных ячеистых бетонов с повышенной прочностью и трещиностойкостью.

Для формирования улучшенной ячеистой структуры использовали рациональные технологические приемы:

**I) при подготовке сырьевых материалов:**

«облагораживание» высококальциевых и сульфатосодержащих зол;

увеличение дисперсности шлакозольных вяжущих до удельной поверхности 4500—5500 см<sup>2</sup>/г с целью устранения неравномерности изменения объема при содержании «пережога» в извести и золе, а также песка, шлаков и зол (заполнителей бетона) для повышения их реакционной способности;

применение мокрого помола заполнителей.

**II) при формировании ячеистой структуры:**

назначение шлакозольных вяжущих оптимальных составов с повышенными прочностными показателями более 15 МПа при заданных условиях твердения;

подбор оптимального состава шлакозольного ячеистого бетона с добавкой и без добавки портландцемента и молотых заполнителей в виде песка, шлака, золы;

введение оптимального количества газообразователя при температуре воды затворения не менее 40—50° С, обеспечивающих наибольший коэффициент вспучивания газомассы в процессе ее схватывания;

обеспечение формирования ячеистой структуры при водотвердом отношении не более 0,3—0,35 за счет длительного перемешивания, либо вибровспучивания или введения структурообразующих плотных или пористых заполнителей в количестве 30—40% (по массе) и 20% (по объему).

Исследования проводили на образцах размером 10×10×10, 15×15×15 и 20×20×20 см и на опытных образцах стеновых панелей размером 270×260×40 см. Как показали результаты многих исследователей [46, 72], трещиностойкость изделий из ячеистого бетона тесно связана с линейными деформациями этих бетонов, которые определяются главным образом видом и



режимом тепловой обработки. Поэтому изучение способов ускорения твердения шлакозольных бетонов, способствующих снижению усадочных деформаций, имеет важное значение при повышении трещиностойкости крупноразмерных конструкций из бетонов с пористой структурой. Повышенные усадочные деформации (до 3—4 мм/м) отмечаются у пропаренных ячеистых бетонов в процессе их эксплуатации. Это является их большим недостатком, так как значительная величина усадки приводит к образованию волосных, открытых, сквозных трещин в ограждающих конструкциях, что снижает их несущую способность и долговечность.

В отечественной и зарубежной литературе имеются разноречивые гипотезы, объясняющие причины усадки и различные данные о величине усадочных деформаций. Последнее объясняется отсутствием общей методики определения усадки, а также разнородностью используемых сырьевых материалов.

Так, по данным П. И. Боженова и др. [7] с увеличением объемной массы неавтоклавного пенобетона с 770 до 1100 кг/м<sup>3</sup> усадка в 30-суточном возрасте увеличивается с 0,82 до 1,047 мм/м; по данным П. Леви, усадка неавтоклавного ячеистого бетона с объемной массой 850 кг/м<sup>3</sup> в возрасте 40 сут составила 0,95 и 1,82 мм/м при объемной массе 1050 кг/м<sup>3</sup>. Об уменьшении усадки с увеличением объемной массы приведены результаты исследований в работах О. Графа и Г. Шеффлера. При этом необходимо отметить, что исследователи указывают на повышенные усадочные деформации ячеистых бетонов, твердеющих в обычных условиях (от 3 до 5 мм/м) и при пропаривании (от 2 до 4 мм/м), независимо от видов сырья и технологии их изготовления.

Единых установленных норм по величине усадки ячеистого бетона нет. Однако практика применения бетонов в крупногабаритных конструкциях с усадкой более 2 мм/м в гг. Ангарске, Красноярске, Днепропетровске, Донецке и др. позволила обнаружить серьезные дефекты в изделиях при их эксплуатации, в частности, образование волосных и раскрытых трещин. Это свидетельствует о продолжающихся глубоких структурных изменениях за счет температурно-влажностных колебаний в бетоне в зависимости от условий эксплуатации конструкций.

С целью гарантии от растрескивания в ФРГ и Шве-

ции рекомендуется применять ячеистый бетон с усадкой не более 0,5 мм/м, в Дании для автоклавного газозолобетона установлена величина допускаемой усадки, которая не должна превышать 0,4 мм/м.

Таким образом, вопрос об установлении допускаемых пределов усадочных деформаций пока еще не решен. Не выяснены окончательно причины возникновения и механизм усадочных деформаций.

Изучением линейных деформаций автоклавных и неавтоклавных ячеистых бетонов занимались: А. В. Волженский, К. Э. Горяйнов, М. Ф. Чебуков, А. Т. Баранов, М. Я. Кривицкий, Л. М. Розенфельд, А. С. Науменко, Н. И. Федьнин, Е. С. Силаенков, А. А. Федин и др.

Исследователи указывают, что на величину усадки и набухания влияют изменение влажности бетона и интенсивность объемных деформаций, происходящих вследствие физико-химических взаимодействий воды, вяжущего и заполнителя [1, 83]. При этом отмечается, что величина собственных деформативных изменений в 5—10 раз меньше, чем величина влажностных деформаций, связанных с потерей бетоном влаги.

Снижение усадочных явлений в ячеистых бетонах достигается различными мероприятиями. Р. Сенулье предлагает осуществлять быстрое удаление избыточной воды из ячеистого бетона до его твердения. Это может быть достигнуто сушкой свежееотформованных изделий в специальных туннельных сушилках при строгом контроле температурно-влажностных условий.

Уменьшение усадки может быть достигнуто также введением в ячеистый бетон легкого заполнителя — пемзы, керамзита, аглопорита [81]. Для снижения усадки и повышения трещиностойкости можно вводить в бетон частые арматурные сетки, синтетические и органические волокна, которые обеспечивают равномерное распределение усадочных напряжений и повышают прочность бетона при растяжении.

Однако в настоящее время единственным эффективным способом уменьшения усадки считается автоклавная обработка ячеистых бетонов при 175° С и выше. По данным ряда исследователей, усадка автоклавного газобетона с объемной массой 600 кг/м<sup>3</sup> составляет от 0,4 до 0,5 мм/м и 0,5—0,65 мм/м при объемной массе 900—1200 кг/м<sup>3</sup>.

Майер и Нильсон разделяют явления усадки на четыре вида:

внутреннюю усадку без обмена воды с окружающей средой;

экологическую усадку при обмене воды с окружающей средой;

усадку при схватывании;

усадку после схватывания.

Все виды указанных деформаций протекают при различных градиентах влажности и усадки, что изменяет форму тела бетона и способствует возникновению внутренних напряжений.

Исследователи по-разному объясняют эти явления, но большинство работ посвящено установлению минимальных величин влажности ячеистого бетона после твердения, что и, по нашему мнению, является решающим фактором в трещиностойкости изделий.

Влажность затвердевшего ячеистого бетона, как показали наши исследования, зависит на 10—15% от свойств используемого сырья, до 20—25% от состава бетона и величины  $V/T$ , на 20% от технологии его приготовления и формовки изделий и на 40—50% от вида и режима тепловлажностной обработки этих изделий.

В настоящее время влажность крупноразмерных изделий из пенобетона и газобетона, выпускаемых заводами, находится в пределах 20—25%, конструкции из пеносиликата, газосиликата имеют влажность 25—30% и из газозолосиликата — до 30—40%.

Необходимо отметить, что при автоклавной обработке и твердении изделий на стендах с использованием метода электропрогрева влажность бетона на 20—30% ниже, чем при пропаривании в среде насыщенного пара. Однако и эти прогрессивные методы тепловлажностной обработки изделий не позволяют получать ячеистые бетоны с влажностью в 10—15%.

Между тем удаление влаги из конструкций в смонтированных зданиях протекает медленно и неравномерно по сечению изделий, что отрицательно влияет на теплотехнические показатели бетона и долговечность ограждающих конструкций.

С целью определения влияния вида тепловлажностной обработки на конечную влажность газобетона и его деформативные свойства образцы оптимальных составов подвергали запариванию в автоклаве, пропариванию в

камерах с последующей сушкой горячим воздухом, контактному электропрогреву и прогреву инфракрасными генераторами — ТЭНами.

Сравнительные результаты исследований запаренных и пропаренных шлакозольных бетонов показали, что влажность последних составляет 18—20% для ячеистых бетонов с добавкой 40% гранулированного шлака (при  $V/T=0,28$ ), 20—25% с добавкой керамзита, крошки из газозолобетона, безобжигового зольного гравия (при  $V/T=0,32$ ) и 29—32% без добавки заполнителей (при  $V/T=0,43$ ), что на 20—30% выше, чем у запаренных. Газозолобетон без структурообразующей добавки в условиях пропаривания способен даже набрать дополнительную влагу, т. е. в этом случае  $V/T$  не оказывает решающего влияния на конечную влажность бетона. При замене части тонкодисперсного зольного или шлакового заполнителя структурообразующими добавками влажность затвердевшего бетона снижается в 1,5—2 раза.

Полные влажностные усадочные деформации запаренных бетонов с заполнителями составляют 0,3—0,4 мм/м, а без них 0,8—0,9 мм/м, что в 2—2,5 раза ниже, чем для пропаренных.

Величина усадки свежeproпаренных образцов, высушенных до равновесной влажности, находится в пределах 0,65—0,6 и 1,6—1,8 мм/м (с заполнителями и без него), запаренных в автоклаве 0,1—0,2 и 0,5—0,7 мм/м соответственно.

Меньшие значения линейных деформаций были установлены для бетонов, изготовленных на основе высококальциевых шлаков при прочих равных условиях. При использовании кислых и сверхкислых шлаков и зол ячеистые бетоны характеризовались повышением усадочных деформаций на 20—30% только после пропаривания.

Снижение величин усадок для бетонов, изготовленных из высококальциевых доменных шлаков, сверхкислых топливных шлаков, зол и шлаков цветной металлургии, достигалось введением в состав бетона 50—75 кг портландцемента на 1 м<sup>3</sup> или удлинением цикла изотермического прогрева при пропаривании до 16—20 ч вместо 10—12 ч и при запаривании до 10—12 ч вместо 6—8 ч.

Таким образом, величина усадки ячеистых бетонов, определенная при изменении влажности свежeproпаренных и запаренных бетонов до равновесной, составляет 60—70% от полной влажностной усадки, возникающей

при высушивании до постоянной массы. Полученные данные позволяют констатировать, что основные усадочные деформации ячеистых бетонов развиваются при снижении влажности с 25—35 до 5—7% по массе. Удаление влаги в этот период является причиной появления трещин усадочного характера.

Из сказанного следует, что значительные деформативные изменения ячеистого бетона, возникающие в эксплуатационных условиях при достижении равновесной влажности, могут быть устранены путем дополнительной сушки пропаренных изделий в заводских условиях или включением в технологию производства изделий термообработки, совмещающей изотермический процесс и процесс сушки.

Однако процесс конвективной сушки термочувствительных капиллярно-пористых материалов без ухудшения их качества очень сложен. В сплошных крупноразмерных изделиях из ячеистого бетона трудно сочетать ускоренный процесс переноса влаги в них с исключением углубления зоны испарения. Интенсифицировать процесс сушки, как показали наши исследования, можно введением в состав газобетона плотного и пористого заполнителя или устройством технологических пустот в центральном слое изделий.

Условия твердения оказывают существенное влияние не только на изменение линейных деформаций ячеистых бетонов, но и на их прочностные характеристики (табл. 34, а). Прочность при сжатии запаренного шлакозолобетона на 20—30% выше прочности пропаренного при прочих равных условиях. В то же время равнопрочные газозолошлакобетоны как при пропаривании, так и при запаривании можно получить оптимизацией технологических процессов приготовления ячеистого бетона при использовании рациональных составов шлакозольных вяжущих. Особый интерес представляют исследования кинетики роста прочности шлакозольных вяжущих при различных режимах пропаривания и запаривания, которые проводились сотрудниками МИСИ им. В. В. Куйбышева под руководством А. В. Волженского. Исследовалась также возможность сокращения режима водотепловой обработки шлакозольного ячеистого бетона за счет использования послепропарочного твердения, позволяющего достичь требуемой прочности к 14—28-суточному возрасту после окончания прогрева бетона, т. е. к тому

Таблица 34, а. Влияние режимов пропаривания и запаривания на прочность при сжатии и деформативные свойства ячеистого шлакозобетона

Вид шлака и состав вяжущего, %	Объемная масса в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Режимы, ч	Пропаривание при 95° С				Запаривание при 175° С			
			влажность, %	прочность при сжатии, МПа, сухих		усадка, мм/м	влажность, %	прочность при сжатии, МПа, сухих		усадка, мм/м
				сразу	через 28 сут			сразу	через 28 сут	
Высоко- и среднекальцевый гранулированный доменный (85 : 10 : 5)	800—750	2+6+2	31	3,1	5,6	2,8	25	5,2	5,8	1
		2+8+2	35	4	5,2	2,5	25	6,7	6,5	0,9
		2+10+2	35	4,8	5,4	2,3	26	6,8	6,5	0,9
		2+12+2	33	5,6	5,9	2	24	6,8	6,7	0,8
		2+16+2	30	6,1	6,3	2	21	6,5	6,5	0,7
Сверхкислый гранулированный (никелевый, топливный) 75 : 20 : 5	800—750	2+20+2	32	5,8	6	1,9	22	6,2	6,4	0,7
		2+8+2	33	3,8	5,3	2,9	25	5,4	5,5	1,2
		2+12+2	32	4,7	5,1	2,5	25	6	5,9	1
		2+16+2	32	5,6	5,8	2,1	21	5,8	6	0,8
		2+20+2	30	5,2	5,7	2,1	20	5,5	5,9	0,8
Сверхкислая пылевидная зола 60 : 35 : 5	500—470	2+8+2	42	0,8	1,3	3,1	30	1,4	1,5	1,7
		2+12+2	39	1,1	1,5	3,2	28	1,6	1,6	1,3
		2+16+2	40	1,2	1,5	2,8	27	1,7	1,7	1,1
Сульфатосодержащая пылевидная зола 80 : 15 (портландцемент) : 5	800—750	2+4+2	37	2,5	4,3	3,5	30	2,7	3,4	1,9
		2+8+2	39	3,7	4,6	2,8	28	4,5	4,7	1,3
		2+12+2	37	4,8	5,5	2,5	25	5,5	5,4	1,1
		2+16+2	38	5,5	5,7	2,2	26	5,2	5,3	1,1
Шлакопортландцемент из топливного гранулированного шлака 60 : 35 : 5 (клинкер) : шлак : гипс)	800—750	2+4+2	34	3,3	5,7	3	—	—	—	—
		2+8+2	33	4,8	6,1	2,2	—	—	—	—
		2+12+2	32	6,2	7,5	2	—	—	—	—
		2+16+2	33	6,3	8	2	—	—	—	—

времени, когда конструкции получают расчетную нагрузку.

Приведенные данные в табл. 34, а свидетельствуют о возможности получения равнопрочного ячеистого бетона из доменных гранулированных шлаков в 6,3 МПа после запаривания по режиму 2+8+2 ч или после пропаривания по режиму 2+16+2 ч с последующим твердением в течение 28 сут. Полные усадочные деформации, определенные сразу после тепловой обработки, составили 0,9 и 2 мм/м соответственно. В то же время усадка пропаренных образцов, определенная после 28-суточного нахождения их на воздухе, была в пределах 0,7—0,8 мм/м, т. е. в два раза ниже. Для сверхкислых гранулированных шлаков прочность при сжатии оказалась ниже на 10—15%, а величина усадки на 5—10% выше.

С сокращением времени изотермического прогрева с 16 до 6 ч при пропаривании прочность снижается почти в два раза, а при запаривании только на 15%. Однако через 28 сут после пропаривания прочность почти достигает прочности запаренных образцов по режиму 2+8+2 ч. С увеличением изотермического прогрева до 20 ч прочность при сжатии несколько снижается при пропаривании и запаривании и уменьшаются усадочные деформации на 25—30%.

Сверхкислые золы в ячеистых бетонах обеспечивают необходимую прочность при сжатии после пропаривания только при добавке 75 кг портландцемента на 1 м<sup>3</sup> бетона. При этом усадочные деформации остаются в пределах 2,2—2,9 мм/м. С целью снижения усадки необходимо введение структурообразующей добавки. Те же закономерности наблюдались и при использовании в ячеистом бетоне сульфатосодержащей золы.

Повышенная прочность до 7—8 МПа при сокращенных режимах пропаривания была получена при использовании в ячеистом бетоне шлакопортландцемента марки 300 из сверхкислых гранулированных шлаков.

Изменения прочности и усадочных деформаций шлакозольных ячеистых бетонов предопределялись возникающими продуктами гидратации и их фазовыми превращениями в зависимости от вида и режимов ускорения твердения шлакозольных вяжущих веществ [22].

Цементирующее вещество образца ячеистого шлакобетона, пропаренного по режиму 2+6+2 ч при темпера-

туре  $95^{\circ}\text{C}$ , характеризовалось преобладанием слабо измененного шлакового стекла, покрытого с поверхности тонкой пленкой темных продуктов его гидратации, обладающих светопреломлением в пределах  $1,50\text{--}1,51$ . В межзерновом пространстве присутствует прозрачная гелевидная фаза, представляющая собой субмикросталлический гидросиликат  $\text{C}_2\text{SH}_2$  с вкраплением изотропных кристалликов гидрогранатов, имеющих  $N = 1,620\text{--}1,625$  и относящихся тоже к низкокремнеземистым разновидностям. Свободная гидроокись кальция присутствует только в виде редких кристаллов с размером кристаллов  $10\text{--}30$  мкм. Количество ее не велико. Кальцит присутствует тоже в небольших количествах. Увеличение продолжительности изотермического прогрева до 8 ч сопровождается изменением фазового состава новообразований и увеличением их количества. В образцах наблюдается присутствие кристаллической фазы в виде  $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ , имеющего вид призм или пластинок с размером до  $2 \times 6$  мкм, и  $N = 1,6$ . Для присутствующего  $\text{CSH}(\text{B})$  характерно уменьшенное светопреломление до  $1,51\text{--}1,52$ , изотропность и эффект рекристаллизации. Основность гидросиликатов — 0,8 при повышенной удельной поверхности, которая способствует связыванию большого количества воды. При выдержке в течение 12 ч наблюдается заметное уменьшение гидратной воды, но общее количество продуктов гидратации увеличивается. Лучшая окристаллизованность цементирующего вещества приводит к повышению его среднего светопреломления до  $1,53\text{--}1,535$ . Возрастает содержание пластинчатого гидросиликата  $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$  и гидрогранатов. Свободная гидроокись кальция сохраняется в отдельных частицах. Процесс перекристаллизации гидросиликатов четко выражен в пропаренном бетоне по режиму  $2+20+2$  ч. Максимально увеличивается количество продуктов твердения и уменьшается величина удельной поверхности новообразований до  $26,6$  м<sup>2</sup>/г вместо  $27,3$  м<sup>2</sup>/г при выдержке 6 ч. Уменьшается также содержание гидратной воды на  $5\text{--}7\%$ . Цементирующее вещество обладает светопреломлением до  $1,54$ . Повышается содержание  $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$  и кристалликов гидрогранатов. Модификации сульфата кальция не наблюдаются, ионы  $\text{SO}_4^{2-}$  входят в состав гелевидного цементирующего вещества. При использовании кислых и сверхкислых шлаков уменьшается несколько основность  $\text{C}_2\text{SH}_2$  и содержание  $\text{H}_2\text{O}$  до 2 молей, а также



уменьшается основность и  $CSH(B)$ . Возможно возникновение и комплексного соединения в виде гидросульфосиликоалюминатов кальция. Последующее твердение продолжается за счет гидратации и гидролиза шлакового стекла с одновременной перекристаллизацией субмикроркристаллических фаз, сопровождающейся также уменьшением удельной поверхности новообразований и количества воды в их составе.

Анализируя процессы твердения ячеистого бетона на шлаковых вяжущих, можно отметить, что прочность при сжатии возрастает с увеличением объема цементирующего вещества. Более быстрый рост прочности и повышенные его показатели характерны для быстро гидратирующихся вяжущих из высококальциевых шлаков. Поэтому максимальные значения прочности при сжатии для высококальциевых шлаков были достигнуты при режиме  $2+12+2$  ч и для сверхкислых  $2+16+2$  ч.

Дальнейшее твердение сопровождается интенсивной рекристаллизацией гелевидных фаз с повышением содержания кристаллических новообразований (более 30%), что оказывает положительное влияние на уменьшение усадочных деформаций, но снижает прочность бетона на 10—15%. Результаты этих исследований подтверждаются работами А. В. Волженского, который считает, что продолжительность тепловой обработки приводит к укрупнению новообразований («огрублению структуры»), что является причиной снижения прочности цементного камня и оказывает существенное влияние на капиллярно-пористую структуру ячеистого бетона.

Запаренные образцы из газошлакобетона характеризовались более полным гидролизом шлакового стекла и более высоким содержанием субмикроркристаллических новообразований, включающих кристаллические фазы — пластинки гидросиликатов  $C_2SH(A)$  и изотропные зерна гидрогранатов в небольшом количестве. При введении в состав бетона молотого песка увеличивалось содержание гидрогранатов. В бетонах из ново-тульского и ждановского шлаков отмечалось небольшое количество гидрооксида кальция. Максимальная прочность была получена при изотермической выдержке 8—12 ч, минимальная усадка при 16—20 ч. Запаренные ячеистые бетоны из сверхкислых шлаков при температуре  $175^{\circ}C$  отличались повышенным содержанием кристаллической фазы, которая слагалась  $C_2SH(A)$ ,  $CSH(B)$  и повышенным содер-

жанием гидрогранатов с размером кристалликов от 1—2 до 3—5 мкм. Образующаяся при запаривании гелевидная фаза была бесцветна, прозрачна, изотропна и имела низкое светопреломление до 1,50—1,51. При введении молотого песка увеличивались содержание низкоосного гидросиликата кальция,  $CSH(V)$  и прочность. Максимальная прочность образцов была достигнута при запаривании в течение 10—12 ч и минимальная усадка была обнаружена после 16—20 ч изотермического прогрева.

При пропаривании газозолобетона вокруг капелек или обломков стекла возникает тонкая реакционная кайма (до 2—3 мкм) из прозрачной гелевидной фазы низкого светопреломления. Аморфизированное вещество разбухает и превращается в полупрозрачную массу. В промежутках указанных фаз присутствует изотропное вещество, включающее редкие кристаллики несвязанной  $Ca(OH)_2$ . Увеличение продолжительности прогрева до 12 ч ускоряет процессы гидролиза аморфных фаз, увеличивает их количество. Межзерновое пространство заполняется изотропными гидрогранатами. Аморфизированное глинистое вещество почти полностью гидролизуется. Цементирующее вещество становится плотнее. Однако прочность при этом возрастает всего на 10—15%. Наибольшая прочность зольного бетона достигается только при запаривании в автоклаве за счет более глубоких и полных процессов гидратации зольных составляющих, обеспечивающих возникновение большего количества новообразований, включающих низкоосновный волластонитовый гидросиликат кальция  $CSH(V)$ . При этом и несколько снижается усадка. Как показали исследования, прочность запаренного газозолобетона может быть еще увеличена и за счет введения молотого кварцевого песка в количестве 15—20%.

Дополнительный помол при использовании сульфатосодержащих зол усреднил химический состав вяжущего и способствовал разрушению оболочек вокруг  $CaSO_4$  и  $CaO$ . Это позволило устранить неравномерность изменения объема и повысить реакционную способность золы.

На первом этапе твердения золобетона в течение 4—6 ч изотермического прогрева происходят такие же процессы, как и в бетонах на сверхкислых золах. Однако из-за неполной гидратации  $CaO$  и малого растворения  $CaSO_4$  продуктов твердения возникает меньше, поэтому прочность при сжатии на этих золах на 15—20% ниже,

чем у образцов из обычной золы. Увеличение продолжительности изопрогрева до 6—8 ч повышает прочность почти в 1,5 раза. Соответственно растет количество гидратных новообразований.

Дальнейшее удлинение пропаривания до 10—12 ч сопровождается ростом прочности и развитием гидратации  $\text{CaO}$  и  $\text{CaSO}_4$ , связывания гидроокиси кальция с  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и кристаллизации двухводного гипса. Проведенные исследования свидетельствуют о сложном многостадийном процессе твердения сульфатосодержащих зол, которое включает гидросиликатное и гидросульфоалюминатное твердение, предопределяющее возникновение  $\text{C}_2\text{SH}_2$ , местами переходящее в  $\text{CSH}(\text{B})$ , и гидросульфоалюминатов кальция. При запаривании в автоклаве увеличивается содержание  $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$  и  $\text{CSH}(\text{B})$ , а гидросульфоалюминат кальция разлагается с выделением  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Но при этом прочность при сжатии не увеличивается, а в отдельных случаях наблюдается и снижение ее на 20—30%.

Как уже указывалось, повышенные прочности при коротких режимах пропаривания и последующего твердения бетона в течение 28 сут на воздухе показали образцы, изготовленные из шлакопортландцемента и молотого гранулированного шлака (состав бетона 1 : 0,5).

Физико-химические исследования позволили определить фазовый состав затвердевшего бетона. При изотермическом прогреве в течение 6 ч продукты гидратации слагаются гидратированными клинкерными минералами и продуктами гидролиза шлакового стекла. С увеличением продолжительности прогрева до 8—10 ч резко возрастает количество новообразований, которое включает кристаллические соединения до 10—15%. С удлинением прогрева до 16—20 ч прочность несколько снижается, а содержание кристаллической фазы увеличивается, что оказывает положительное влияние на усадочные деформации.

Возможность дополнительного упрочнения ячеистых шлакозольных бетонов после завершения тепловой обработки по сокращенным или обычным режимам достигается выдерживанием бетона в воздушно-влажных условиях относительной влажности воздуха от 60 до 85% и температуре 18—20°С в течение 14 — 28 сут. В этом случае прирост прочности ячеистых бетонов из шлаков и зол за 28 сут после пропаривания по режимам 2+6+2 ч

и  $2+8+2$  ч достигает 30—50%. В то же время после пропаривания бетона по режиму  $2+16+2$  ч и  $2+20+2$  ч или запаривания по режиму  $2+8+2$  ч прирост прочности почти не наблюдается. Послепропарочное твердение заметно изменяет не только прочностные показатели, но и фазовый состав гидратированных новообразований.

Проведенные исследования показывают, что в течение 28 сут послепропарочного твердения происходят дальнейшая гидратация и гидролиз шлаков и зол с кристаллизацией гидрогеленита, способствующие увеличению количества цементирующего вещества. При этом чем короче был цикл пропаривания, тем больше прирост прочности и активнее продолжающийся процесс новообразований. Вместе с тем, необходимо отметить, что гидросиликатное твердение приводит к получению относительно более высоких прочностных показателей цементирующего вещества, чем гидросульфоалюминатное, и в более короткие сроки (до 7—10 сут). Дальнейшее выдерживание бетона при нормальной температуре (более 28 сут) не влияет на прочность и фазовый состав затвердевших образцов, что свидетельствует о затухании процессов гидролиза и гидратации стеклофазы из-за возникновения плотных пленок новообразований на поверхности зерен шлака и золы.

Послепропарочное выдерживание в течение 28 сут шлакозольных бетонов, прошедших тепловую обработку по режиму  $2+20+2$  ч, способствует увеличению прочности всего на 5—10% почти без заметного изменения фазового состава продуктов гидратации. Незначительный прирост прочности обусловлен, вероятно, не гидролизом стеклофазы, а уплотнением цементирующего вещества.

Ячеистые бетоны, изготовленные на основе шлакопортландцемента из молотого топливного гранулированного шлака, независимо от режимов пропаривания, после 28 сут выдерживания в воздушно-сухих условиях обнаружили склонность к повышению прочностных характеристик и в течение последующих 3—6 мес, причем при коротких режимах прирост прочности к 6 мес составил 20—25%, при обычных 15—20% и при удлиненных до 10%.

Запаренные образцы из ячеистого шлакозолобетона после 28-суточного нахождения в воздушно-влажных условиях характеризовались незначительным приростом прочности (до 5—10%).

Вероятно, длительное пропаривание по режиму  $2+$

+20+2 ч и автоклавная обработка шлакозольного бетона приводят к созданию плотных и труднорастворимых гидратных соединений вокруг шлаковых и зольных частиц, что определяет прекращение процесса гидролиза последних при дальнейшем нахождении их на воздухе.

Таким образом, при соответствующих технологических приемах и культуре производства метод ускорения твердения шлакозольных ячеистых бетонов при атмосферном давлении и температуре 95°С можно признать рациональным и перспективным. При производстве ячеистобетонных изделий из шлаков и зол в пропарочных камерах можно выделить следующие положительные стороны:

1. Не требуются металлоемкие автоклавы и котельные с паром высокого давления.

2. Размер изделий не ограничивается размерами пропарочных камер.

3. Использование более мягкого тепловлажностного режима обуславливает меньшую, чем у автоклавных изделий, опасность возникновения трещин в период тепловой обработки.

## 2. ПРОПАРИВАНИЕ ШЛАКОЗОЛЬНЫХ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ СУШКОЙ ДО РАВНОВЕСНОЙ ВЛАЖНОСТИ

Практика применения изделий из ячеистых бетонов различных видов в наружных стенах выявила случаи недостаточной их стойкости во времени из-за возникающих трещин разной ширины и глубины на поверхности стеновых блоков и панелей.

При этом повышенной склонностью к образованию трещин характеризуются изделия, изготовленные с применением паровой обработки при температуре 90—100°С, предопределяющей высокую послепропарочную влажность бетона до 35—40%.

Анализ влияния различных видов «самопроизвольных» деформаций затвердевшего бетона приводит к выводу, что для целостности изделий с пористой структурой опасны усадки материала при его высыхании, т. е. при работе конструкций в эксплуатационных условиях.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что изделия из ячеистого бетона должны направляться с завода на строительные площадки такими, чтобы их влажность соответствовала равновесной, устанавли-

ливающейся в изделиях при длительной эксплуатации здания.

Для доведения влажности ячеистого бетона до равновесной в короткие сроки необходимо бетон подвергать искусственной сушке [49].

Пока еще нет экспериментально проверенных данных о режимах и допустимой интенсивности сушки ячеистых бетонов. Не определены оптимальная влажность для различных видов ячеистых бетонов и влияние ее на деформативные их изменения в процессе эксплуатации. Отсутствуют рекомендации по способам сушки изделий в заводских условиях.

Учитывая важность этого вопроса, автором были проведены исследования в этой области. В работе решались два вопроса: 1) возможность сушки шлакозольного ячеистого бетона сразу после изотермического периода пропаривания и определение деформативных свойств высушенного бетона; 2) определение скорости испарения влаги из ячеистого бетона, расхода воздуха и тепла на его сушку. Исследование процессов сушки ячеистого бетона проводилось на экспериментальной установке, в которой осуществлялось и пропаривание бетона.

Установка была оборудована вентилятором, электрокалорифером, металлической камерой с теплоизоляционными ограждениями для пропаривания и сушки бетона. В период пропаривания ячеистого бетона насыщенный пар по резиновому шлангу подавали из автоклава. Сушильным агентом при сушке бетона являлся нагретый воздух до  $150^{\circ}\text{C}$ , который поступал в камеру сразу после окончания пропаривания.

Режим пропаривания при  $90-95^{\circ}\text{C}$  был принят  $2+8+2$  ч. Образцы сушили при  $150^{\circ}\text{C}$  в течение 4 и 6 ч.

В камере устанавливали образцы размером  $4\times 4\times 16$  см для определения усадки ускоренным способом и размером  $10\times 10\times 40$  см для определения усадки при длительном хранении на воздухе с различной влажностью, а также образцы-кольца для определения трещинообразования в процессе сушки. Помимо усадки и трещинообразования определяли прочность ячеистого бетона, объемную массу и его влажность в процессе пропаривания и сушки.

На образцах-кольцах подбирали режимы сушки — температуру подаваемого воздуха и время сушки. При температуре воздуха  $300^{\circ}\text{C}$  на кольцах появлялись тре-

щины через 60—90 мин, при 200° С через 2—3 ч, при 110 и 150° С трещин на кольцах не было в течение 6—8 ч.

Для ускорения процессов сушки температура воздуха была принята 150° С и время сушки 4 ч до 5—7% влажности и 6 ч до постоянной массы образцов.

Высушенные образцы имели прочность на 15—20% выше, чем свежепропаренные, и на 5—10% выше, чем пропаренные и высушенные через 2—3 сут после тепло-влажностной обработки. Это объясняется удалением воды без вторичного ее нагревания, которое происходит во втором случае.

Полные влажностные усадки высушенных образцов были на 20—30% ниже, чем у образцов пропаренных. По-видимому, сушка ячеистого бетона способствует увеличению содержания кристаллической фазы в цементном камне, которая препятствует развитию усадочных деформаций.

Высушенные образцы бетона характеризовались также и пониженными величинами набухания. Так, пропаренный газозоло- и шлакобетон с объемной массой 700—800 кг/м<sup>3</sup>, высушенный до влагосодержания 5—6%, имел усадку 0,4—0,5 мм/м через 6 мес хранения на воздухе с относительной его влажностью 60%, а бетон с добавкой 35% топливного шлака — 0,2 мм/м.

При этом полная влажностная усадка высушенного бетона без добавки шлака составляла 1,6 мм/м и набухание 1,2 мм/м вместо 2,3 и 1,9 мм/м для пропаренного бетона, с добавкой гранулированного шлака и керамзита 0,5 и 0,3 мм/м вместо 0,9 и 0,7 мм/м соответственно. Таким образом, при эксплуатации в условиях переменного температурно-влажностного режима и повышенной относительной влажности воздуха изделия из ячеистого шлакозольного бетона с влажностью 5—7%, за счет меньших влажностных деформаций, будут более трещиностойки и долговечны.

Учитывая сложность процесса сушки крупноразмерных изделий из ячеистого бетона, вторую часть работы проводили с целью определения скорости испарения влаги из шлакозольного бетона, расхода воздуха и тепла.

Образцы из пропаренного газозолобетона с добавкой 35% топливного гранулированного шлака сушили на лабораторной сушильной установке (рис. 38). Перед испытанием образцы насыщали водой в течение 48 ч и помещали в сушильную камеру.

Во время сушки определяли параметры режима сушильного процесса:

$t_0, t'_0$  — температуры воздуха, поступающего в сушильную камеру, по показаниям соответственно сухого и мокрого термометров ПС-1;

$J_0$  — относительную влажность воздуха, поступающего в сушильную установку, по психрометрическим таблицам ПС-1;

$d_1$  — влагосодержание воздуха, поступающего в калорифер и сушильную камеру, по ПС-2, смонтированный из двух термопар; термоэлектродвижущая сила каждой определяется переносным потенциометром. По таблицам находят температуру сухой и мокрой термопары;

$W_k$  — скорость воздуха — определяли по анемометру и микроанометру.

У большинства коллоидных и капиллярных пористых тел, к которым относятся и ячеистые бетоны, влагоотдача при их сушке происходит неравномерно во времени.

В качестве первого этапа исследования процесса сушки определялась кривая скорости сушки (рис. 39).

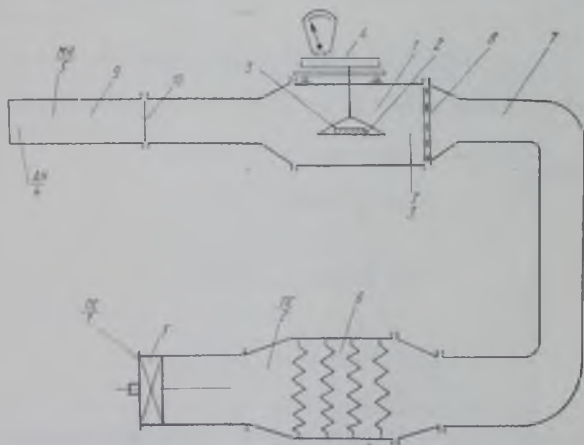


РИС. 38. СХЕМА СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

1 — сушильная камера; 2 — подвеска с образцом; 3 — образец газобетона; 4 — циферблатные весы; 5 — осевой вентилятор; 6 — электрический калорифер; 7 — трубопровод горячего воздуха; 8 — распределительная решетка; 9 — трубопровод обработанного воздуха; 10 — жалюзийный шибер



В конечный период сушки кривая сушки приближается к равновесному влагосодержанию материала при данной температуре. Таким образом, кривая сушки дает представление о том, до какой влажности целесообразно сушить данный материал.

Кривая скорости сушки строилась в координатах  $u = \frac{du}{dt}$  (скорость сушки) (рис. 40).

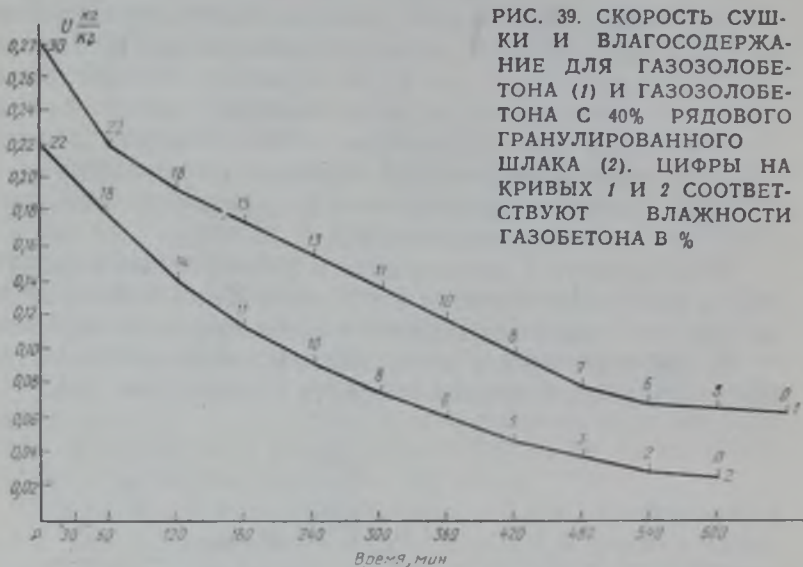


РИС. 39. СКОРОСТЬ СУШКИ И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ ДЛЯ ГАЗОЗОЛОБЕТОНА (1) И ГАЗОЗОЛОБЕТОНА С 40% РЯДОВОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ШЛАКА (2). ЦИФРЫ НА КРИВЫХ 1 И 2 СООТВЕТСТВУЮТ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОБЕТОНА В %

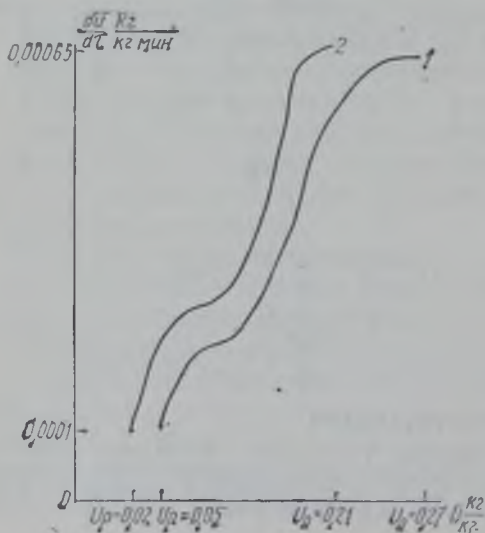


РИС. 40. ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЛАГООТДАЧИ ГАЗОЗОЛОБЕТОНОМ (1) И ГАЗОЗОЛОБЕТОНОМ С 40% РЯДОВОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ШЛАКА (2)

По ней судят об интенсивности влагоотдачи в отдельные периоды сушки.

Расход воздуха и тепла при сушке образцов из газозолобетона определяют по формулам.

Начальное количество влаги в бетоне

$$G'_W = \gamma^c W_1,$$

где  $\gamma^c$  — объемная масса бетона в сухом состоянии,  $\gamma^c = 958 \text{ кг/м}^3$ ;  $W_1$  — абсолютная влажность (на сухое вещество) бетона  $W_1 = 0,262$ ;  $G'_W = 958 \cdot 0,262 = 250 \text{ кг/м}^3$ .

Остаточное количество влаги

$$G''_W = \gamma^c W_2 = 958 \cdot 0,07 = 67 \text{ кг/м}^3.$$

Удаленная влага

$$\Delta G_W = \gamma^c (W_1 - W_2) = 183,9 \text{ кг/м}^3.$$

Расход тепла на сушку  $1 \text{ м}^3$  бетона

$$Q = q_{4g} \Delta G_W = 1300 \cdot 183,9 = 238\,000 \text{ ккал},$$

где  $q_{4g} = 1200 - 1400 \text{ ккал/кг}$  — удаление влаги.

Расход условного топлива определяли с учетом КПД калорифера, который составляет обычно 50—60%. Принимаем  $\eta_k = 0,55$ . Тогда удельный расход условного топлива

$$B_y = \frac{238\,000}{7000 \cdot 0,55} = 62 \text{ кг на } 1 \text{ м}^3 \text{ бетона.}$$

Для образцов из газозолобетона с 35% гранулированного шлака:

$$G'_W = 1100 \cdot 0,240 = 264 \text{ кг/м}^3;$$

$$G''_W = 1100 \cdot 0,025 = 27,5 \text{ кг/м}^3;$$

$$\Delta G_W = 236,5 \text{ кг/м}^3;$$

$$Q = 1300 \cdot 236,5 = 317\,400 \text{ ккал.}$$

Расход условного топлива

$$B_y = \frac{317\,400}{7000 \cdot 0,55} = 82 \text{ кг/м}^3 \text{ бетона.}$$

Опыты показали, что конвективная сушка при постоянных параметрах теплоносителя оказывает различное влияние на скорость испарения влаги и остаточную влажность в ячеистом бетоне в зависимости от его состава.

Так, для газозолобетона процесс сушки длился 12 ч, а с добавкой гранулированного шлака — 10 ч. При этом

равновесная влажность для указанных бетонов в 6—7% была достигнута через 8 и 6 ч.

Остаточная масса влаги после сушки до постоянной массы составила для газобетона без добавки шлака  $67 \text{ кг/м}^3$  и с добавкой —  $27 \text{ кг/м}^3$ , т. е. в 2,5 раза меньше, чем для газозолобетона. Повышенное содержание остаточной влажности оказывает отрицательное влияние на усадочные деформации золобетона, которые продолжают развиваться и после сушки бетона при длительном его хранении в воздушных условиях при относительной влажности воздуха 60—70%. Таким образом, полная влажностная усадка ячеистых бетонов состоит из деформаций при высушивании насыщенных водой образцов и деформаций, возникающих при удалении остаточной влажности со временем. Как показали исследования для пропаренного газозолобетона, общая полная усадка составляет 2,8—2,9 мм/м, а для ячеистого бетона с добавкой гранулированного шлака — 1—1,1 мм/м.

Полученные результаты подтверждают необходимость искусственной сушки пропаренных ячеистых бетонов. Однако процесс сушки термочувствительных капиллярно-пористых материалов без ухудшения их качества очень сложен. В крупноразмерных изделиях из ячеистого бетона трудно сочетать ускоренный процесс переноса влаги в них с исключением углубления зоны испарения. Некоторые закономерности этих процессов были получены в предварительных исследованиях, подтверждающих зависимость интенсивности внутреннего переноса влаги от структуры и состава бетона. Повышенная температура теплоносителя быстрее нагревает образец из бетона с добавкой гранулированного шлака, чем без добавки, что интенсифицирует перенос в нем влаги в 1,5 раза. При достижении в образцах 10% влажности (на золе через 6 ч с добавкой шлака через 4 ч) наблюдается некоторое увеличение времени сушки. В дальнейшем испарение влаги несколько замедляется (1—1,5% в 1 ч вместо 4—3% в 1 ч).

При толщине изделия 30—40 см процессы тепло- и массообмена в период сушки значительно усложняются. Для определения оптимальных параметров и режимов сушки в этом случае необходимо изучать критериальные зависимости скорости движения, температуры и влагосодержания теплоносителя, длительность сушки и влияния их на физико-механические свойства материалов

[13, 63, 75, 78]. Вместе с тем, проведенные исследования позволили предварительно оценить расход топлива при высушивании 1 м<sup>3</sup> ячеистого бетона до постоянной массы; для газозолобетона удельный расход условного топлива составляет 62 кг/м<sup>3</sup>; для ячеистого бетона с добавкой гранулированного шлака расход условного топлива 82 кг/м<sup>3</sup>.

Сушку пропаренных ячеистобетонных изделий можно производить также электроконтактным нагревом в беспаровой среде, индуктивно-термическим методом, инфракрасными излучениями, токами высокой частоты и др.

Однако при всех способах сушки требуется создать такие режимы, чтобы скорость перемещения влаги соответствовала допустимому градиенту влажности по всей толщине изделия. Для этой цели в изделиях толщиной 30—40 см с повышенной влажностью (25—40%), а также для ускорения процесса сушки целесообразно предусматривать при их изготовлении технологические пустоты. Эти пустоты можно использовать для подачи в них теплоносителя при сушке бетона или устройства в них различных видов переносных нагревателей.

### 3. ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ЯЧЕИСТОГО ГАЗОЗОЛОШЛАКОБЕТОНА МЕТОДОМ КОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОПРОГРЕВА

Метод ускорения твердения бетона путем нагревания его электрическим током основан на принципе преобразования электрической энергии в тепловую. Достигается это включением бетона как сопротивления в цепь переменного тока промышленной частоты с помощью металлических электродов.

При этом происходит непосредственный прогрев бетона, а не окружающей среды, как это имеет место при использовании других методов тепловой обработки [12].

Принцип использования электрического тока для прогрева бетона и железобетона основан на законе Джоуля — Ленца:

$$Q = 864I^2RT = 0,864IUT = 0,864K \frac{U^2\rho T}{\rho b}$$

где  $Q$  — количество тепла, выделяемого при прохождении тока, в ккал;  $I$  — сила тока, А;  $U$  — падение напряжения на контактах электродов;  $R$  — сопротивление прогреваемого бетона, Ом;  $T$  — время прохождения тока, ч;  $\rho$  — удельное сопротивление бетона, Ом·см;  $b$  — расстояние между электродами, см;  $\rho$  — площадь контакта изделия с электродами, см<sup>2</sup>;  $K$  — коэффициент, учитывающий влияние конструкции электродов.

Принципиальное преимущество электропрогрева перед пропариванием и запариванием состоит в том, что в процессе электропрогрева тепло выделяется более или менее равномерно по всему объему изделия, в то время как при указанных видах термообработки тепло подается к центру изделия за счет теплопроводности материала. В процессе электропрогрева происходит непрерывное испарение влаги, в то время как при пропаривании и запаривании изделие первоначально поглощает воду, а затем частично ее теряет. Влажность электропрогреваемых изделий поэтому несколько ниже влажности пропаренных.

В процессе электропрогрева при постоянном напряжении, которое пока имеется почти на всех предприятиях, применяющих эту технологию, скорость подъема температуры в основном зависит от удельного омического сопротивления бетона.

$$P = \frac{US}{lb} \cdot$$

где  $b$  — расстояние между электродами, см;  $S$  — площадь одного электрода, см<sup>2</sup>;  $I$  — сила тока, А;  $U$  — напряжение, В.

В общем виде величина скорости разогрева бетона  $P$  может быть выражена формулой

$$P = \frac{U^2}{k\rho_0 c} \cdot$$

где  $U$  — напряжение на электродах, В;  $\rho_0$  — удельное омическое сопротивление, Ом/см;  $k$  — коэффициент;  $c$  — теплоемкость бетона.

Существуют различные взгляды на влияние скорости подъема температуры при электропрогреве изделий на их свойства. Исследования, проведенные в НИИЖБ Госстроя СССР для тяжелых и легких бетонов, показывают, что увеличение скорости разогрева свыше 20 град/ч приводит к деформациям расширения, вызывающим нарушение структуры и снижение качества бетона.

Максимальная мощность, потребная для обеспечения заданной скорости разогрева, может быть рассчитана по следующей формуле:

$$P_{\text{макс}} = 5 \cdot 10^{-4} \gamma t' V_0 (1 + 0,04W),$$

где  $\gamma$  — объемная масса бетона в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>;  $t'$  — заданная скорость разогрева изделий, град/ч;  $V_0$  — объем газобетона в изделии, м<sup>3</sup>;  $W$  — относительная влажность газобетона в период разогрева, %.

Чтобы скорость подъема температуры в бетоне не зависела от случайных факторов, обуславливающих колебание величины  $\rho$ , необходимо регулировать напряжение на электродах и рассеиваемую в бетоне электрическую мощность.

В качестве возможных способов регулирования процесса прогрева изделий электрическим током можно назвать:

1) применение автотрансформаторов с регулируемым напряжением типа АТМК-250/05;

2) применение переоборудованных силовых трансформаторов с несколькими ступенями напряжения и др.

При изготовлении изделий из ячеистых бетонов в СССР, Швеции, Дании, Норвегии, Польше и других странах применяется только автоклавная обработка. Лишь на отдельных заводах СССР (в Ангарске, Ухте, Донецке и др.) газозолошлакобетонные панели для стен зданий объемной массой 900—1000 кг/м<sup>3</sup> подвергаются электропрогреву. Теплоизоляционные изделия с электропрогревом не выпускаются ни на одном заводе.

В 1968 г. на Люберецком комбинате строительных материалов и конструкций при выпуске опытной партии изделий из ячеистого шлакозолобетона объемной массой от 450 до 600 кг/м<sup>3</sup> впервые термообработка этих изделий осуществлялась методом контактного электропрогрева.

Многие исследователи считают, что на стадии нагрева пористых бетонов перенос тепла со стороны открытой поверхности в глубь материала происходит в основном за счет проникания пара в поры материала и его конденсации в них. В этом случае перенос тепла теплопроводностью сравнительно мал. В плотных бетонах прогрев изделия по толщине происходит главным образом за счет высокой теплопроводности материала с плотной структурой. С. А. Миронов и Л. А. Малинина [66] установили, что легкий бетон прогревается и остывает медленнее, чем тяжелый, и на основании этого пришли к выводу, что их опыты не подтвердили предположений о лучшей прогреваемости пористых материалов.

Некоторые исследователи объясняют возможность прогрева бетона за счет конденсации пара в капиллярах и порах материала.

Б. А. Новиков считает, что на первой стадии процесса тепловлажностной обработки нагрев их как со стороны нижней закрытой поверхности, так и со стороны верхней

открытой поверхности происходит только за счет теплопроводности. Того же мнения придерживаются Б. Я. Кривицкий, Я. М. Белкин, Э. И. Хаимский и др. А. Д. Дмитриевич считает, что на стадии нагрева проникновение пара в глубь бетона и конденсация его в порах не согласуется с законами термодинамики водяного пара, и такая схема тепло- и массообмена практически не осуществима. По его мнению, на стадии нагрева перенос тепла внутрь материала как со стороны открытой поверхности, так и со стороны поверхности, отделенной от пара металлической стенкой формы, происходит путем теплопроводности и переноса тепла влагой, внедряющейся в поры материала. При этом первый процесс является доминирующим.

При нагревании извне в теле бетона возникают градиенты температуры и давления  $\Delta t$  и  $\Delta p$ , которые достигают значительных величин и, зачастую, отрицательно сказываются на качестве еще сырого бетона.

Преимуществом электропрогрева является то, что разогрев происходит одновременно по всему сечению изделия, что ликвидирует резкие температурно-влажностные перепады, предопределяющие появление внутренних напряжений, отрицательно влияющих на структуру бетона.

Учитывая технические положительные факторы электропрогрева, экономическую эффективность этого способа термообработки и возможность высвобождения автоклавов при производстве теплоизоляционного газобетона, нами был предложен и опробован в заводских условиях новый «электротермосный» метод обработки газозолошлакобетона.

В этом случае в начале электропрогрева изделия из газозолобетона укрываются паронепроницаемой пленкой, что позволяет значительно повысить равномерность распределения температуры по сечению изделия, а также предотвратить непрерывное испарение влаги.

Известно, что температура электропрогрева зависит от величины рассеиваемой в прогреваемом бетоне электрической мощности. Вместе с тем в течение прогрева электропроводимость материала, вследствие повышения его омического сопротивления, падает. Это приводит к тому, что потребляемая изделием мощность уменьшается. Следовательно, уменьшается количество выделяемого тепла и, соответственно, понижается температура. При

возрастающем омическом сопротивлении этого можно достигнуть за счет увеличения напряжения электрического тока до 220, 380, 500 В.

На заводах, применяющих электропрогрев, повышение напряжения производят или ступенями (60, 127, 220 В), или с помощью регуляторов расцениваемой мощности — интроннов и тиристорнов.

Таким образом, причиной, вызывающей необходимость повышения напряжений, является непрерывное и быстрое возрастание омического сопротивления при электропрогреве.

Опыты прогрева изделий, укрытых паронепроницаемой пленкой, показывают, что замедленное испарение влаги из бетона значительно ограничивает скорость увеличения омического сопротивления и электропрогрев теплоизоляционного газозолобетона производится при постоянном напряжении в 40—80 В в течение необходимого режима (изотермическая выдержка от 8 до 14 ч).

Осуществление термообработки изделий при пониженном напряжении электрического тока позволяет также повысить технику безопасности обслуживающего персонала при электропрогреве.

Принимая во внимание прогрессивность метода электропрогрева ячеистого бетона по сравнению с пропариванием, исследовалась возможность совмещения процессов тепловлажностной обработки и сушки с помощью электрического тока. Электропрогрев производился контактным методом, при котором поддон формы служил нижним электродом, а металлическая сетка (размер ячеек 50 мм, диаметр стержней 6 мм) — верхним электродом, сушка производилась инфракрасными излучателями (рис. 41).

Напряжение подводилось через понижающий трансформатор. Ток измерялся в первичной обмотке трансформатора и составлял 4—6 А при напряжении в 220 В.

Подъем температуры до 90° С осуществлялся в течение 3 ч, изотермический период составил 10 ч. Через 13 ч открывались борта и включался генератор. Сушку проводили в течение 7 ч. После контактного электропрогрева температура в бетоне составляла 80—85° С и влажность в пределах 20—22%.

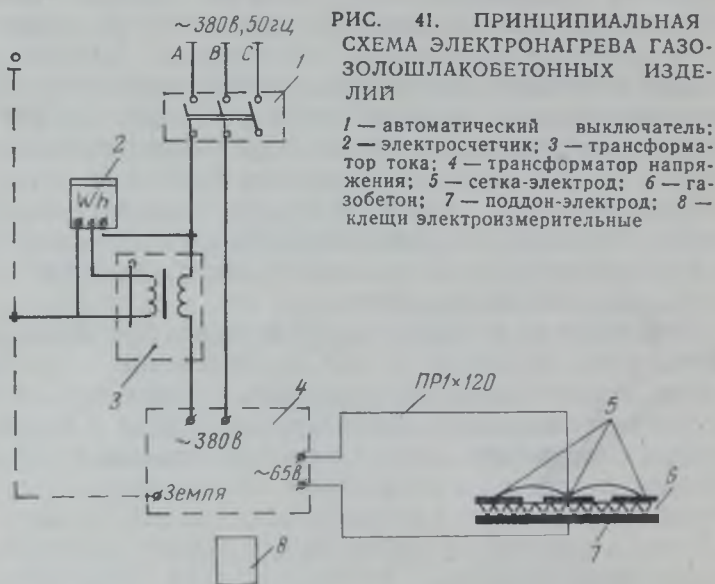
При включении излучателя температура повышалась до 105—110° С. С помощью отключения и включения ге-



нератора удавалось регулировать температуру в бетоне с перепадом по сечению не более 10—15°.

К концу сушки влажность в центре образца составляла 3—4% и в углах до 8—10%. При этом необходимо отметить, что газобетон с добавкой гранулированного шлака более равномерно отдает влагу и имеет меньшее ее количество в конце сушки.

При использовании комбинированного способа тепло-влажностной обработки и сушки изделий из газобетона в производственных условиях необходимо режимы контактного прогрева и сушки определять на конкретных ви-



дах изделий с учетом используемых материалов и технологии изготовления бетона и конструкций.

Параллельно с определением влажности образцов по их сечению определялись для каждого слоя (верхнего, среднего, нижнего) прочность при сжатии и усадочные деформации. При пропаривании влажность верхнего слоя составила 26, среднего 29 и нижнего 31%. При контактном электропрогреве — 22,2 и 18% соответственно. При контактном электропрогреве образцов с технологическими пустотами влажность бетона снизилась до 8—15%, а при прогреве и сушке инфракрасными излучателями конеч-

ная влажность затвердевших образцов составила 5—8% при тех же режимах тепловой обработки (3+12 ч).

При определении усадочных деформаций было установлено, что их величины находятся в прямой зависимости от влажностного состояния газозолобетона после тепловлажностной обработки. Так, пропаренный бетон имел усадку 2,5 мм/м после 6 мес хранения на воздухе. А бетон, обработанный контактным методом электропрогрева (без технологических пустот), характеризовался усадкой в 1,8 мм/м; с технологическими пустотами — 0,4—1,2 мм/м. При прогреве инфракрасными излучателями усадка находилась в пределах 0,3—0,4 мм/м.

Влажность бетона оказывает влияние и на его прочностные характеристики. Бетон с повышенной влажностью (до 30%) имел прочность до 4,2 МПа; при 10—15% влажности — 5,5—5,7 МПа. Однако при этом необходимо отметить, что наибольшую прочность имели высушенные образцы, подвергнутые обработке в пропарочной камере. Цементирующее вещество образцов газозолобетона, вне зависимости от условий их твердения, состоит из трех основных компонентов: гидроокиси кальция в виде мелких (1—3 мкм) анизотропных кристалликов; гидросиликатов кальция  $C_2SH_2$  и  $CSH(B)$ . Последние имеют гелевидный характер, но различаются величиной светопреломления, возрастающей при повышении основности гидросиликата кальция.

При твердении газобетона в пропарочной камере наблюдается увеличенное связывание гидроокиси кальция, развитой поверхностью стеклофазы золы. В результате этого в цементирующем веществе пропаренных образцов преобладают гидросиликаты кальция  $CSH(B)$  и  $C_2SH_2$ , а гидроокись кальция присутствует в небольшом количестве. Связка изотропна и окристаллизована относительно слабо, что вызывает при высыхании повышенные усадочные деформации.

Применение электропрогрева приводит к увеличению содержания свободной кристаллической гидроокиси кальция и двухосновного гидросиликата кальция  $C_2SH_2$ . Одновременно снижается количество волокнистых гидросиликатов кальция группы  $CSH(B)$ , вследствие чего в цементном камне наблюдаются, в основном, рекристаллизованные анизотропные участки.

Прогрев ячеистого бетона генераторами инфракрасного излучения дает возможность совмещать процессы

твердения и сушки. При этом заметно меняется как состав цементирующего вещества, так и его структура. Это объясняется недостаточным содержанием в бетоне воды, что вызывает снижение интенсивности процессов взаимодействия гидрооксида кальция с поверхностью частиц шлака или золы, выполненных стеклофазой; преобладание в составе цементирующего вещества кристаллических фаз — гидрооксида кальция и двухосновных гидросиликатов кальция  $C_2SH_2$  и  $C_2SH(A)$  при весьма малом содержании гелевидных гидросиликатов кальция группы  $CSH(B)$ ; снижение удельной поверхности гидратных новообразований, в связи с чем заметно снижаются гигроскопичность и усадочные деформации ячеистого бетона; локальное увеличение плотности цементирующего вещества на периферии частиц заполнителя, обеспечивающее контактное сцепление последних при повышенной микропустотности межзернового пространства. Таким образом, указанные изменения условий твердения бетона при переходе от пропаривания к электропрогреву приводят к ухудшению процессов твердения, что вызывает некоторое снижение прочности при сжатии, но улучшает степень окристаллизованности цементирующего вещества, обеспечивая уменьшение гигроскопичности и усадочных деформаций бетона.

С целью определения оптимального режима контактного электропрогрева ячеистый бетон готовили на основе вяжущих из высоко- и среднекальциевых гранулированных шлаков, из сверхкислых гранулированных шлаков и пылевидных зол. Для получения равнопрочных ячеистых бетонов, изготовленных из сверхкислых шлаков и зол различной гидравлической активности, в состав бетона вводили портландцемент в количестве 50—75 кг на 1 м<sup>3</sup>. Состав бетона рассчитывали на объемную массу 800—900 и 500—450 кг/м<sup>3</sup>. Образцы размером 20×20×20 см формовали методом вибровспучивания при  $V/T = 0,38—0,44$ .

С целью предотвращения испарения воды из ячеистого бетона в процессе прогрева электрическим током образцы поверх контактного песчаного слоя укрывали водонепроницаемой пленкой. После изотермического цикла пленку снимали и по окончании сушки удаляли песок.

Результаты исследований, представленные в табл. 35, свидетельствуют о реальной возможности получения электропрогретого шлакозольного ячеистого бетона с

прочностными характеристиками, близкими к пропаренным и запаренным бетонам. Кроме того, используя «электротермосный» метод с последующей сушкой, можно получать ячеистые бетоны с пониженной влажностью до 15—20%, вместо 30—35% при пропаривании и обычном электропрогреве. Наибольший эффект при этом наблюдается для бетонов пониженной объемной массы. Снижение конечной влажности способствует увеличению прочности на 15—20% и уменьшению усадочных деформаций. Короткие режимы электропрогрева 4+4 и 4+8 ч не обеспечивают необходимую прочность свежeproгретых бетонов. Однако через 28 сут хранения образцов в воздушно-влажностных условиях прочность при сжатии увеличилась на 30—50%, а при удлиненных режимах только на 10—15% и при сушке на 5—10%. Такая закономерность прироста прочности справедлива для ячеистых бетонов, изготовленных на шлаках и золах. При этом прочность при объемной массе 800—830 кг/м<sup>3</sup> была в пределах 5,8—6,3 МПа и при 490—520 кг/м<sup>3</sup> прочность составила 1,4—1,8 МПа после электропрогрева с сушкой или без сушки через 28 сут воздушно-влажностного хранения. Пониженная гидравлическая активность сверхкислых шлаков и зол компенсировалась введением в состав ячеистого бетона 50—75 кг портландцемента.

С целью выявления возможности снижения конечной влажности в электропрогретых ячеистых бетонах, особенно в бетонах, изготовленных на основе пылевидных зол, были проведены специальные исследования в этом направлении. Работу проводили на образцах размером 30×40×150 см и на стеновых панелях размером 250×275×40 см, изготовленных из пылевидной золы Иркутской ТЭЦ-1. Для снижения влажности в свежeproгретом бетоне в образцах и панелях устраивали технологические пустоты. Сравнительные показатели влажности для газозолобетона в зависимости от вида тепловой обработки представлены в табл. 36.

Пониженная влажность газозолобетона (до 5—6%) обеспечивается при совмещении процесса твердения и сушки с помощью инфракрасных нагревателей (ТЭНов), установленных в технологических пустотах изделий. При такой тепловой обработке усадки снижаются до 0,3 вместо 2,2 мм/м при пропаривании и 1,7 мм/м при контактном электропрогреве. Снижение влажности до 10—12%

Таблица 35. Влияние режимов контактного электропрогрева на свойства ячеистого золошлакобетона

Состав шлакозольного вяжущего и ячеистого бетона	Режимы контактного электропрогрева в ч при температуре 90—100° С	Влажность, % по массе	Объемная масса в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	Усадка, мм/м
<i>Доменный гранулированный шлак</i>					
Липецкого завода 85 : 10 : 5 (шлак : известь : гипс)	4+4	38	500	0,4/0,6	3
	4+8	34	490	0,6/1,3	2,8
	4+12	35	820	4,5/6,1	2,2
1 : 0,5 (вяжущее : молотый гранулированный шлак)	4+12+3 сушка	19	830	5,8/6,3	1,4
	4+12+3 сушка	12	510	1,6/1,8	0,9
Чусовского завода 80 : 15 : 5 (шлак : известь : гипс)	4+8	37	520	0,6/1,4	2,8
	4+12	35	510	1,3/1,6	2,6
	4+12+3 сушка	15	495	1,6/1,9	1,3
<i>Топливный гранулированный шлак</i>					
Мироновской ГРЭС 75 : 20 : 5 (шлак : известь : гипс)	4+4	36	820	2,2/3,8	2,9
	4+8	38	840	3,0/4,9	2,7
	4+12	35	815	4,7/6,1	2,5

1 : 0 на 1 м <sup>3</sup> бетона 50 кг портландцемента	4+16	32	810	6,2/6,4	2,1
	4+12+3 сушка	21	835	5,9/6,3	1,5
	4+12+3 сушка	16	485	1,5/1,9	1,2
60 : 35 : 5	4+8	35	810	4,1/5,8	2,5
(шлак : портланд- цемент : гипс)	4+12	32	825	5,3/6,2	2
1 : 0,5	4+12+3 сушка	17	815	6,2/6,6	1,4
(ШПЦ : молотый гра- нулированный шлак)	4+12+3 сушка	12	500	1,7/2,1	1

*Пылевидная зола*

Мироновской ГРЭС 60 : 35 : 5	4+4	39	900	2,7/4,4	3,2
	4+8	35	900	3,5/5,5	3,2
(зола : известь : гипс)	4+12	38	880	4,8/5,8	2,9
1 : 0 на 1 м <sup>3</sup> бетона	4+12+3 сушка	18	910	5,6/6	1,8
75 кг портландцемента	4+12+3 сушка	15	490	1,2/1,5	1,3

Примечание. Прочность при сжатии над чертой сразу после электропрогрева, под чертой — через 28 сут.

166 Таблица 36. Влияние вида тепловой обработки на свойства газозолобетона

Тепловая обработка	Влажность бетона по слоям, %			Усадка через 6 мес, мм/м			Прочность при сжатии после тепловой обработки, МПа		
	верхний	средний	нижний (у дна формы)	верхний	средний	нижний	верхний	средний	нижний
Пропаривание при 95°С по режиму 3+12+3 ч	26	29	31	1,7	2,2	1,9	4,5	4	4,4
Электропрогрев контактным методом по режиму 3+12+3 ч	$\frac{22}{17}$	$\frac{20}{16}$	$\frac{18}{17}$	$\frac{1,8}{1,2}$	$\frac{1,7}{1}$	$\frac{1,5}{1,1}$	$\frac{4,7}{5,8}$	$\frac{4,3}{5,7}$	$\frac{5}{6}$
	10	5	15	0,8	0,4	1,3	5,2	4	5,1

Тепловая обработка	Влажность бетона по слоям, %			Усадка через 6 мес. мм/м			Прочность при сжатии после тепловой обработки, МПа		
	верхний	средний	нижний (у дна формы)	верхний	средний	нижний	верхний	средний	нижний
Электропрогрев контактным методом на образцах с технологическими пустотами 3+12+3 ч с последующей сушкой горячим воздухом	8	6	12	0,9	0,4	0,9	5,5	5,5	5,7
Прогрев инфракрасными излучателями, расположенными в технологических пустотах 3+12+3 ч	6	3	7	0,4	0,3	0,3	4,3	3,8	4,5

Примечания: 1. Размер образцов 30×40×150 см. Состав бетона 270 кг портландцемента, 30 кг извести, 600 кг золы; CaCl<sub>2</sub> 2—4 кг, алюминиевой пудры — 500 г/м<sup>3</sup>; B/T=0,4. Объемная масса затвердевшего газобетона в сухом состоянии 900—950 кг/м<sup>3</sup>

2. Цифры под чертой — газобетон изготовлен при B/T=0,3 с длительным перемешиванием (15 мин) при расходе алюминиевой пудры 700 г/м<sup>3</sup>.



Т а б л и ц а 37. Основные физико-механические характеристики стеновых панелей из газозолобетона на основе золы Красноярской ТЭЦ, подвергнутых различным условиям тепловлажностной обработки

Тепловлажностная обработка и режимы твердения панелей из газозолобетона	Водоупорное отношение	Температура газомассы, °С	Влажность после тепловлажностной обработки, %			Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>			Прочность при сжатии, МПа			Водопоглощение, %	Коэффициент размягчения	Усадочные деформации, мм/м		
			поверхностный слой 0—5 см	средний слой 0—20 см	наружный слой у форм 0—37 см	после тепловлажностной обработки	в сухом состоянии	в водонасыщенном состоянии	после тепловлажностной обработки	в сухом состоянии	в водонасыщенном состоянии			поверхностный слой 0—5 см	средний слой 10—25 см	наружный слой 25—37 см
Контактный электропрогрев панели сплошные, без длительного перемешивания, температура 95°С, режим 5+17 ч	0,35	38	24,8	20,3	22,8	940	810	1440	2,1	3,1	2,6	44	0,84	1,9	0,8	2
Контактный электропрогрев, панели сплошные; длительное перемешивание в течение 15 мин, температура 80°С, режим 6+16 ч	0,31	38	26	25	24	1260	1010	1560	4,7	5,2	7,1	40	0,89	1,4	0,4	1,6
	0,3	38	24,7	26,5	28	1370	1130	1670	3,3	4,7	4,3	40	0,89	1,5	0,5	1,7

Контактный электропрогрев, панели с технологическими пустотами диам. 10 см, без длительного перемешивания, температура 80° С, режим 5+9 ч	0,38	38	18	18	17	970	750	1390	2,3	3,4	3,1	40	0,75	1,3	0,5	1,3
Контактный электропрогрев, панели с технологическими пустотами диам. 10 см, с длительным перемешиванием в течение 15 мин, температура 80° С, режим 5+9 ч	0,3	30	16,7	9,5	13,5	1170	1030	1600	2,8	3,6	2,5	39	0,8	0,9	0,3	1
	0,3	30	11,3	17,3	17,3	1310	1120	1630	3,3	4	3,8	36	0,88	0,8	0,3	1
Тепловлажностная обработка электронагревателями инфракрасного излучения панели с технологическими пустотами, перемешивание массы 10 мин, температура 95—100° С, режим 5+8 ч	0,3	38	3	2	4	1260	1030	1410	4,4	4,7	4,2	35	0,9	0,2	0,1	0,3

достигается при контактном электропрогреве изделий с технологическими пустотами и пропаривании, включающими процесс сушки горячим воздухом при температуре 150—200° С. Тепловой прогрев бетона в беспаровой среде также снижает конечную влажность на 20—30% по сравнению с пропариванием.

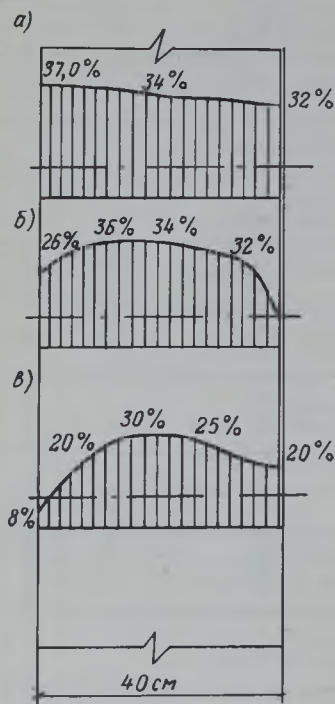


РИС. 42. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В СПЛОШНОЙ ГАЗОЗОЛОБЕТОННОЙ ПАНЕЛИ ПО ЕЕ СЕЧЕНИЮ ПОСЛЕ КОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОПРОГРЕВА ПО РЕЖИМУ 6+16 ч

а — влажность панели через 1 сут после электропрогрева; б — 1 мес хранения на открытом складе; в — двухлетняя эксплуатация в жилом доме

С целью выявления оптимальных режимов электропрогрева исследования проводили на сплошных и пустотелых стеновых панелях, изготовленных из газозолобетона объемной массы 900—950 кг/м<sup>3</sup>.

Для образования пустот в стеновых панелях были изготовлены металлические формы с отверстиями диаметром 11 см и пустотообразователи из труб диаметром 10,2 см.

Пустоты были расположены в центральном слое изделий и находились на расстояниях 15 см друг от друга и от поверхности конструкции.

Газомассу готовили на бегунах с длительным перемешиванием при расходе пудры 600 г на 1 м<sup>3</sup> бетона, водотвердом отношении — 0,3 и температуре воды затворения 38—40° С.

Приготовленную массу укладывали в форму. Через 20—30 мин после заливки формы газомассой пустотообразователи проворачивали и с помощью крана удаляли их из форм. Затем производилась срезка горбушки и затирка поверхностного слоя. Через 3—4 ч открывали борты форм, на поверхностный слой укладывали арматурную

170

сетку и засыпали песком. По окончании работ включали ток.

Подъем температуры в панели до 95—100°С длился 4—5 ч, выдержка при этой температуре составила 10 ч.

Результаты по определению свойств затвердевших панелей представлены в табл. 37.

В процессе тепловой обработки определялась влажность в панели по ее сечению. Кроме того, определялись линейные деформации с помощью реперов, установленных на глубине 5 и 20 см по сечению панели.

Температуру в процессе электропрогрева определяли ртутными термометрами, термометрами сопротивления и термопарами.

В первые часы электропрогрева влажность в панели составила 30—35% по всему сечению изделия.

Через 8—10 ч электропрогрева над пустотами и между ними влагосодержание начало уменьшаться и к окончанию электропрогрева достигло 9—11%. В наружном слое панели (у поддона) влажность составила 13—17%. В поверхностном слое на глубине 5 см влажность находилась в пределах 12—16%.

При электропрогреве сплошных панелей влажность в поверхностном, среднем и наружном слое находилась в пределах 26—28%, (рис. 42).

Усадочные деформации, определенные на образцах с влажностью 12—16%, через 6 мес хранения на воздухе составили 0,8—0,9 мм/м, что должно соответствовать усадкам поверхностного слоя панели.

Усадка газозолобетона с влажностью 9—11% составила 0,3—0,5 мм/м, что соответствует среднему слою панели. И усадочные деформации газозолобетона с влажностью 13—17% находились в пределах 1—1,1 мм/м, что соответствует наружному слою панели.

Газозолобетон с влажностью 26—28% имел усадку в среднем 1,4—1,7 мм/м, т. е. в 1,5—2 раза выше, чем для газозолобетона с пониженной влажностью.

По усадочным деформациям панели (рис. 43) были определены напряжения в среднем и поверхностном слоях, возникшие через 5 сут после тепловлажностной обработки.

Можно предположить, что достаточно равномерное снижение влажности по сечению панели приводит к небольшим градиентам усадочных деформаций, а значит и

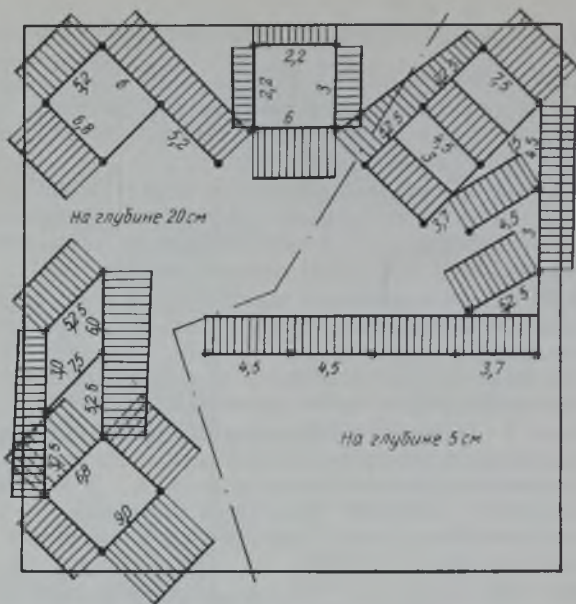


РИС. 43. ЭПЮРЫ НАПРЯЖЕНИЙ В СРЕДНЕМ И ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЯХ ЭЛЕКТРОПРОГРЕТОЙ ГАЗОЗОЛОБЕТОННОЙ ПАНЕЛИ. ЦИФРЫ — ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЙ

внутренних напряжений, что уменьшает и возможность появления трещин в процессе эксплуатации зданий.

Все это предопределяет технико-экономическую эффективность производства пустотных стеновых панелей из безавтоклавного газозолобетона методом контактного электропрогрева.

#### 4. ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ГАЗОЗОЛОШЛАКОБЕТОНА С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

Термообработка и сушка крупногабаритных изделий из газозолошлакобетона с помощью ТЭНов, размещаемых в пустотах последних, выгодно отличается от способа электропрогрева и пропаривания. При облучении изделий лучистая энергия непосредственно поглощается поверхностью и ближайшими к ней слоями материала [47].

Количество поглощенной лучистой энергии зависит по закону Стефана — Больцмана от разности абсолютных температур излучателя и материала и от степени их черноты, а также от взаимного расположения излучателя и материала и рассчитывается по формуле

$$q = C_0 \psi \left[ \left( \frac{T_1}{100} - \frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где  $C_0$  — коэффициент излучения черного тела, равный 4,9 ккал/м<sup>2</sup>·ч·К;  $\psi$  — угловой коэффициент, зависящий от расположения поверхности излучения и поглощающей поверхности материала;  $T_1$  и  $T_2$  — температуры излучающей поверхности и материала, К.

Поток инфракрасных лучей проникает в газобетон на глубину 0,1—0,3 мм, зависящую от структуры и длины волны излучения. Стенки капилляров и пор многократно отражают лучи, что способствует почти полному поглощению лучистой энергии подобно абсолютно черному телу.

Основной закон перемещения влаги в капиллярно-пористых телах может быть представлен по А. В. Лыкову следующим образом. Плотность потока влаги через единицу поверхности равна:

$$q' = -a' \rho_0 (\Delta U \pm \delta \Delta t),$$

где  $a'$  — коэффициент влагопроводности, м<sup>2</sup>/ч;  $\rho_0$  — плотность сухого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta$  — термоградиентный коэффициент, кг/кг·°С;  $\Delta U$  и  $\Delta t$  — соответственно градиенты влажности и температуры.

Для газобетона уравнение усложняется потреблением влаги при гидратации вяжущего.

В качестве генераторов инфракрасного излучения могут быть использованы лампы инфракрасного излучения, плоские металлические и трубчатые излучатели. В производстве крупноразмерных изделий из газозолошлакобетона, имеющих толщину 25—40 см, целесообразно применять трубчатые излучатели с внутренним облучением изделий. Это дает возможность уменьшить расход электроэнергии и снизить влажность центральных слоев изделий.

На рис. 44 показано изменение температуры и влагосодержание в блоке размером 15×30×45 см из газозоллобетона объемной массой 950 кг/м<sup>3</sup> при нагреве его трубчатыми излучателями, помещенными в полости. Весь процесс прогрева можно разделить на три периода; подь-

ем температуры до 85—95° С, изотермическая выдержка, сушка при открытых поверхностях блока.

В период подъема температуры средняя влажность блока уменьшается с 32 до 26% вследствие испарения влаги с поверхности пустот. В конце первого периода градиент температуры в зоне облучения достигает 15—20 град/см. Перемещение влаги в этот момент происходит в основном под действием термовлагопроводности в

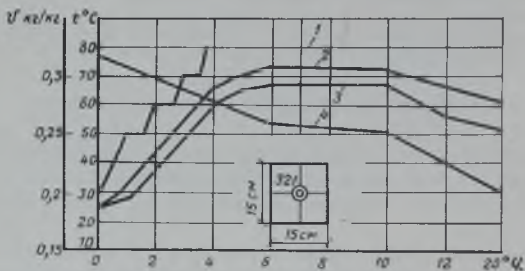


РИС. 44. ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В ОБРАЗЦЕ ПРИ ПРОГРЕВЕ ТЭНами

1, 2 и 3 — температура; 4 — влагосодержание

сторону меньших температур, т.е. к поверхностным слоям.

Регулирование влагосодержанием может производиться прерывным облучением, в этом случае во время отключения ТЭНов температура материала у поверхности пустот падает и влага перемещается под действием влагопроводности к центральным слоям блока, т.е. в обратном направлении.

В период изотермической выдержки влажность блока практически не изменяется, так как градиент температуры, влияющий на перемещение влаги, компенсируется градиентом влажности.

В период сушки блока, т.е. при снятии паро- и теплоизоляционного покрытия, температура поверхности блока падает, при этом наблюдается интенсивное испарение с влаги с его поверхности. Направление движения потока влаги под действием влагопроводности совпадает с направлением движения потока под действием термовлагопроводности.

В случае прогрева блока ТЭНами при данном режи-

ме максимальная влажность (15—20%) наблюдается в поверхностном слое, минимальная (10—12%) в центральном слое блока. После контактного электропрогрева, при пропаривании влажность по всему сечению блока находится в пределах 30—38%. При выдерживании блоков на воздухе влажность поверхностных слоев резко падает, а влажность центральных слоев остается в тех же пределах. У крупноразмерных изделий это приводит к трещинообразованию.

В изделиях, прогретых ТЭНами, скорость испарения влаги с поверхности значительно меньше вследствие более низкой влажности после прогрева, а возникающие усадочные деформации поверхностного слоя лишь способствуют снятию напряжений, вызванных усадкой центрального слоя. Вероятность появления трещин в поверхностном слое резко уменьшается. Следовательно, введение в процесс производства крупноразмерных газобетонных изделий операции сушки инфракрасным облучением позволяет снизить общую влажность изделий, усадочные деформации и тем самым повысить трещиностойкость изделий.

Задачу интенсивной термообработки и рациональной сушки изделий из ячеистых бетонов на основе шлаков и зол разрешает предлагаемый способ с помощью генераторов теплового излучения, размещаемых в специально создаваемых пустотах в теле изделий, панелей, блоках и т. п. Для этого при формовании изделий в формы устанавливаются пустотообразователи (обычно цилиндрической формы). После начального твердения бетона пустотообразователи извлекают из изделия, а в образовавшиеся пустоты устанавливают генераторы теплового излучения, например металлические спирали с определенным электросопротивлением, обеспечивающие при пропускании через них электротока разогрев бетона до 90—95°С через 2—3 ч. Изделия прогреваются и твердеют в закрытых и теплоизолированных формах.

Время твердения зависит от вида бетона и объема изделий и находится в пределах 8—12 ч при температуре в теле бетона не более 90—95°С. Нагрев спиралей генераторов может производиться до 400—500°С при автоматическом отключении в случае повышения температуры в бетоне выше 95°С. Сушка бетона осуществляется сразу же по окончании изотермического твердения. Для этого открывают борта формы.



Продолжительность сушки бетона до влажности в 6—10% находится в пределах 2—4 ч и зависит от свойств бетона и толщины изделий. Она устанавливается опытным путем.

Таким образом, предлагаемый способ обеспечивает возможность получения с помощью электроэнергии изделий надлежащей прочности и влажности (до 6—10%) в условиях единого кратковременного технологического цикла при одном и том же оборудовании. В дополнение к проведенным исследованиям термообработка ТЭНами осуществлялась по разным режимам 2+4, 4+4, 4+8 ч при температуре изотермического прогрева 95—105°С.

Исследовалось влияние скорости подъема температуры, длительности изотермического прогрева на прочность газозобетона, распределение влажности и усадочные деформации. Указанные свойства газобетона определялись для поверхностного, центрального и нижнего слоев. Результаты испытаний представлены в табл. 37, 38 и 39 и на рис. 45, 46.

Т а б л и ц а 38. Влияние режимов прогрева ТЭНами на свойства газозобетона

Режим термообработки, ч	Влажность после термообработки, %			Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		Предел прочности при сжатии, МПа		Применная прочность, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Усадка при высушивании до постоянной массы, мм/м	Полная влажностная усадка, мм/м
	с поверхности	центральный	нижний	после термообработки	в сухом состоянии	после термообработки	в сухом состоянии				
2+4,	Через 1 ч прогрева проявились трещины										
4+4	17	10	22	1160	960	5	7,6	4,5	1,5	$\frac{1,36}{1,85}$	2,04
4+8	15	8	18	1150	970	5,8	7,8	5	1,7	$\frac{1,15}{1,6}$	1,8
4+12	12	6	18	1150	960	6,2	8	5,5	2	$\frac{0,9}{1,4}$	1,6

Примечание. Усадка при высушивании: над чертой — для центрального слоя, под чертой — для поверхностного слоя панели.

Т а б л и ц а 39. Влияние длительного прогрева ТЭНами на свойства газозлобетона

Режим термообработки, ч	Слой	Влажность, % по массе	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		Прочность при сжатии, МПа		Призмная прочность, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Усадка высушенного до сорбционной влажности 6—10%, мм/м	Усадка высушенного до постоянной массы, мм/м
			после термообработки	в сухом состоянии	после термообработки	в сухом состоянии				
4+14, температура 95—105° С	Поверхностный	11	910	830	6,5	7,5	5	1,7	0,9	1,44
	Центральный	6	857	815	6	7	4,5	1,5	0,55	1,15
	Наружный	13	948	840	5,9	7	4,5	1,5	0,88	1,61

Данные, представленные в табл. 38, показывают, что скорость подъема температуры при термообработке ТЭНами определяется структурной прочностью газозлобетона перед прогревом. Так, при двухчасовом подъеме температуры прочность газозлобетона данного состава оказалась недостаточной, чтобы противостоять напряжениям, возникающим в результате температурно-влажностного перепада в центральных и поверхностных слоях. На блоках появились сквозные трещины. С увеличением длительности термообработки до 16 ч прочность при сжатии увеличивается незначительно (с 7,6 до 8 МПа). Это объясняется, вероятно, замедлением процессов гидратации вяжущего после 12-часового изотермического прогрева бетона, сопровождающегося значительным испарением влаги. Поэтому при выборе режима термообработки необходимо определять скорость испарения влаги (которая не должна превышать 2—3% в 1 ч) и конечную влажность с учетом прочностных характеристик. Оптимальным режимом для данного состава газобетона является 4+12 ч. При указанном режиме прочность газозлобетона составляет 8 МПа. Влажность в поверхностных слоях не превышает 12—16% и в центральном слое — 6%.

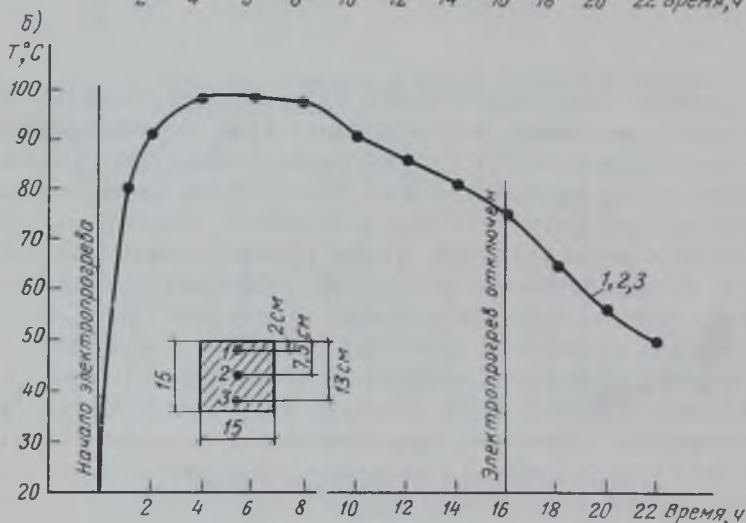
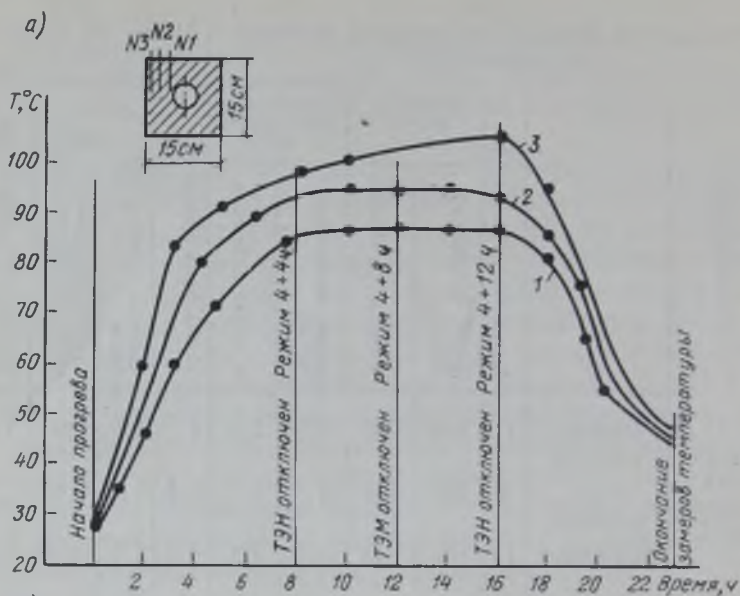


РИС. 45. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ГАЗОЗОЛОБЕТОНЕ ПРИ ПРОГРЕВЕ ТЭНами (а) И ПРИ КОНТАКТНОМ ЭЛЕКТРОПРОГРЕВЕ (б)

С увеличением длительности термообработки до 12—14 ч величина усадки при высушивании до постоянной массы уменьшается с 2 мм/м, характерной для режима 4+4 ч, до 1,2 мм/м. Величина влажностной усадки изменяется по сечению изделия. Так, для поверхностных сло-

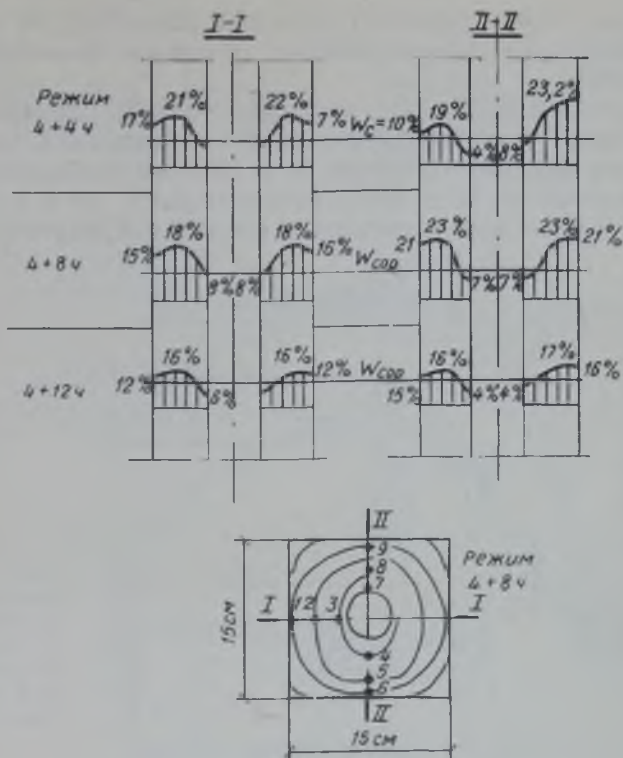


РИС. 46. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В ГАЗОЗОЛОБЕТОНЕ ПОСЛЕ ПРОГРЕВА ТЭНами

ев усадка при высушивании до постоянной массы составляет 1,4—1,6 мм/м, высушивании до сорбционной влажности 0,88—0,9 мм/м; для центрального слоя—0,6—1,1 мм/м.

Следовательно, уже в процессе термообработки в результате интенсивного испарения влаги протекают основные усадочные деформации, главным образом в центральных слоях изделия. Изменяя длительность изотермического прогрева, температуру в бетоне, можно регулировать величину влагосодержания по толщине изделий и получать низкоусадочные безавтоклавные ячеистые бетоны.

С целью определения оптимальных режимов прогрева ТЭНами крупноразмерных изделий исследования прово-

дили на стеновых панелях размером  $250 \times 275 \times 40$  см, изготовленных из газозолобетона объемной массой  $900\text{—}950$  кг/м<sup>3</sup>.

Электронагреватели устанавливали на специальных подставках и включали в сеть. Изотермический прогрев и сушка длились в течение 14 ч. Подъем температуры в теле бетона до  $95\text{—}100^\circ\text{C}$  осуществлялся за 4 ч, после 4 ч прогрева были приоткрыты продольные борта формы

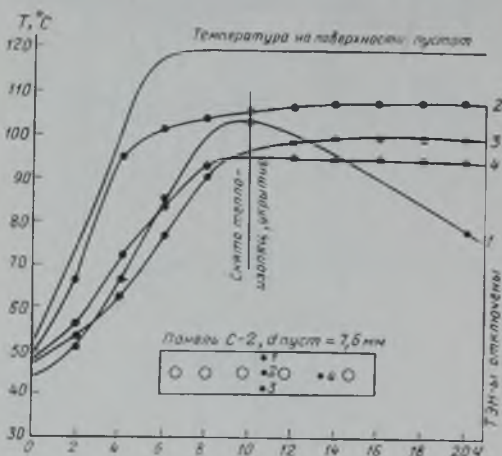


РИС. 47. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПАНЕЛЯХ С ПУСТОТАМИ ПРИ ПРОГРЕВЕ ТЭНами

на 2—3 см. После 12 ч с поверхности панели был снят теплоизоляционный слой и открыты два продольных борта. Температура в бетоне была повышена до  $110\text{—}115^\circ\text{C}$ . Через 14 ч термопрогрева генераторы были отключены (рис. 47, 48). Начальная влажность поверхностного слоя панели, среднего и наружного (у поддона) составляла 35%. В первые часы термообработки наблюдалось набухание газозолобетона, которое для средних слоев составило  $0,5\text{—}0,75$  мм/м и для поверхностных слоев —  $0,2\text{—}0,3$  мм/м. В последующем через 12—14 ч термообработки наблюдались усадочные деформации средних слоев ( $0,4\text{—}1,5$  мм/м) и увеличение набухания в поверхностных слоях. Через 5 сут хранения изделия на воздухе усадочные деформации как в средних, так и в поверхностных слоях увеличились до  $1,2\text{—}2,2$  мм/м от начала их определения.

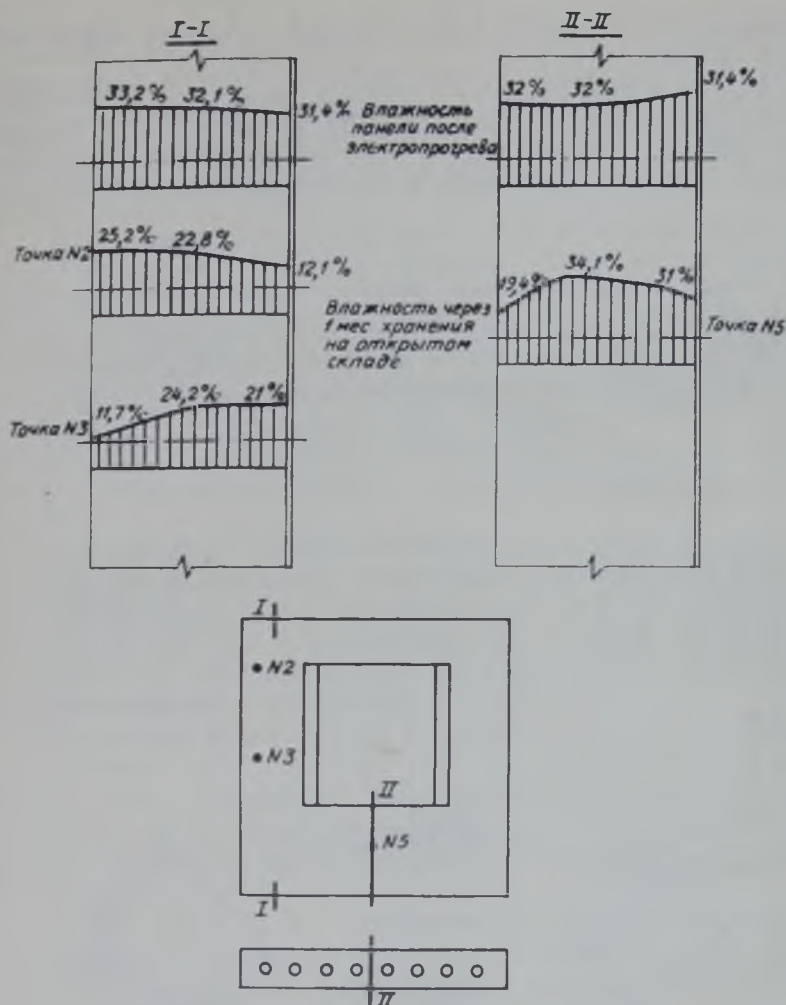


РИС. 48. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В ПАНЕЛЯХ С ПУСТОТАМИ ПОСЛЕ КОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОПРОГРЕВА

На изменение величины деформаций существенное значение оказывают температурные изменения и влажностное состояние бетона. Построенные эпюры напряжений свидетельствуют об их равномерном распределении по сечению панели как при термообработке, так и при эксплуатации (рис. 49).

Влажность, определенная с помощью отбора проб на глубине 5, 20, 37 см, была в пределах 3—5% для цент-

ральной части панели и 7—10% для торцовых поверхностей панели.

Интенсивное удаление влаги в процессе термообработки, несмотря на повышенную температуру в бетоне (до 115°С), способствовало получению бездефектных изделий с низкой остаточной влажностью. Высыхание газо-

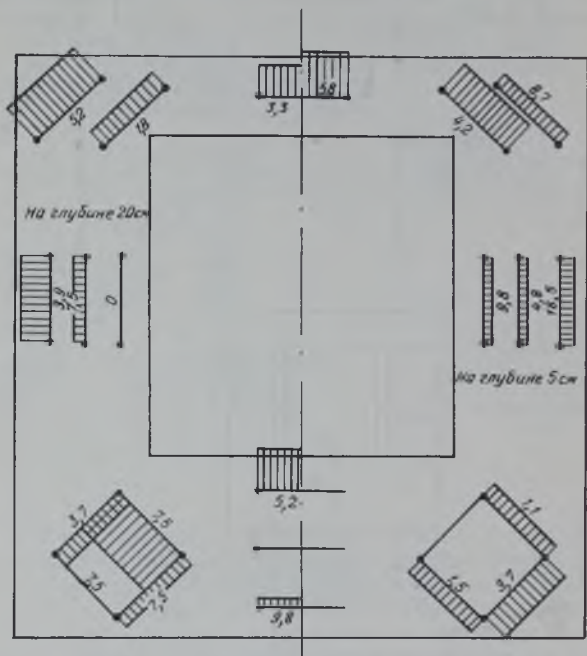


РИС. 49. ЭПЮРЫ НАПРЯЖЕНИЙ В ПАНЕЛИ ЧЕРЕЗ 5 СУТ ПОСЛЕ ПРОГРЕВА ТЭНами. ЦИФРЫ — ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЙ

золобетона сопровождалось усадочными деформациями также с равномерным распределением их по всей толщине изделия.

На основе лабораторных исследований установлено, что газозобетон с влажностью 3—5% при длительном нахождении на воздухе характеризуется усадочными деформациями 0,3—0,5 мм/м. Это дает основание полагать,

что при термообработке генераторами инфракрасного излучения панели с влажностью 7—10% при эксплуатации в здании будут обладать пониженными усадочными деформациями и повышенной трещиностойкостью по сравнению с панелями при повышенной влажности, т. е. более 20%.

Исследованиями установлено, что продолжительность электропрогрева ТЭНами оказывает влияние на изменение фазового состава продуктов твердения газозолобетона. Исследовались образцы, полученные при электропрогреве ячеистой бетонной смеси, изготовленной из газозолобетона по заводской технологии, по режимам: 4+4ч, 4+12, 4+14, 4+16 ч при температуре изометрического прогрева 90—100°С. Общее время пребывания бетона в зоне максимальных температур колебалось от 4 до 16 ч.

При прогреве по режиму 4+4 ч газозолобетон характеризуется наименьшей степенью гидратации клинкерных минералов. В его составе сохраняется довольно много алита, а белит и алюмоферриты кальция выглядят практически неизменными. Гидратируется достаточно полно лишь трехкальциевый алюминат.

Цементирующее вещество представлено прозрачным изотропным гелем с  $N=1,53$ , представляющим собой гидросиликат кальция  $C_2SH_2$ , который включает анизотропные выделения свободной гидроокиси кальция.

Частицы золы практически не изменены и сохранили четкость контуров.

Таким образом, на первом этапе электропрогрева в течение 4 ч происходит гидратация минералов портландцементного клинкера с выделением гидроокиси кальция.

Увеличение продолжительности изотермического прогрева до 10—12 ч существенно повышает полноту гидратации клинкера, за счет чего в газозолобетоне почти нацело исчезает алит мелких фракций (с поперечником до 10 мкм) и уменьшается количество белита. Заметно возрастает количество свободной гидроокиси кальция. Усложняется и состав гидросиликатов кальция. В основной массе геля  $C_2SH_2$  появляются мелкие анизотропные кристаллики двухосновного гидросиликата кальция  $C_2SH(B)$ .

Начинается взаимодействие частиц золы с гидроокисью кальция, в результате которого на поверхности частиц возникает тонкая (1—2 мкм) темно-бурая пленка



низкопреломляющих гелевидных гидросиликатов кальция группы CSH(B).

Превышение длительности водотепловой обработки сверх оптимальной приводит к снижению содержания свободной  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и дифференциации новообразований в цементирующем веществе на низкоосновные гидросиликаты кальция группы CSH(B), тоберморит и высокоосновный кристаллический гидросиликат кальция  $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ . При микроскопическом исследовании было зафиксировано снижение количества негидратированного клинкера с прогревом газозолобетона по режимам  $4+12$  ч и  $4+16$  ч. Этот факт может быть объяснен только значительным повышением содержания гидрогранатов.

Установленное изменение характера цементирующего вещества газозолобетона при длительном электропрогреве позволяет регулировать величину усадочных деформаций изделий путем изменения продолжительности электропрогрева, увеличение которой приводит к кристаллизации цементирующего вещества с соответствующим снижением деформаций усадки и набухания бетона.

В результате лабораторных и производственных исследований установлено, что безавтоклавный газшлакозобетон, полученный методом электропрогрева, проявляет способность к твердению как при последующем хранении на открытых площадках (в том числе и в зимнее время), так и при эксплуатации в зданиях и сооружениях. Твердение обусловлено гидратацией и гидролизом шлакового или зольного стекла, связыванием гидроокиси кальция с  $\text{SiO}_2$  и переходом фазы  $\text{C}_2\text{SH}_2$  в низкоосновные гидросиликаты кальция группы CSH(B) с составом, близким к  $\text{C}_4\text{S}_3\text{H}_n$ . Последние два процесса осуществляются за счет взаимодействия  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{C}_2\text{SH}_2$  со стеклофазой зольных или шлаковых частиц.

При введении в состав ячеистого бетона портландцемента количество продуктов новообразований возрастает за счет гидратации клинкерных материалов, что положительно влияет на прочность изделий и их долговечность. Электропрогрев изделий из ячеистого бетона требует более тщательной их герметизации для предотвращения раннего пересушивания ячеистой смеси, вызывающего повышение основности продуктов твердения, которое сопровождается уменьшением как прочности при сжатии, так и величины усадочных деформаций. Вследствие этого

поверхность изделий необходимо укрывать водонепроницаемой пленкой.

Длительное перемешивание ячеистой смеси не влияет на полноту гидратации сырьевых материалов, но способствует снижению основности и улучшению кристаллизации гидросиликатов кальция. В таком бетоне образуется значительно больше тоберморита, уменьшающего усадочные деформации и повышающего трещиностойкость панелей. Последующее твердение бетона при эксплуатации панелей, в случае применения длительного перемешивания, проходит более интенсивно: быстрее и более полно гидратируются компоненты шлакозольного бетона. Возникает больше низкоосновных гидросиликатов кальция группы  $CSH(V)$ .

Благодаря этому изделия, изготовленные при длительном перемешивании, обладают лучшими физико-механическими свойствами и большей долговечностью, чем изделия, изготовленные с  $V/T$  более 0,4 по литевой технологии.

Переход от контактного электропрогрева к прогреву изделий ТЭНами приводит к некоторому замедлению процесса гидратации компонентов вяжущего и увеличению основности и окристаллизованности гидросиликатов кальция за счет преимущественного образования  $C_2SH_2$  и  $C_2SH(A)$ . Результатом этого является замедленный рост прочности бетона при сжатии, компенсирующийся снижением усадочных деформаций бетона и улучшением его трещиностойкости.

Последующее твердение бетона в изделиях при их хранении или эксплуатации развивается несколько менее интенсивно, чем при контактном электропрогреве, в случае обычной заводской схемы подготовки ячеистой смеси (т. е. при обычном перемешивании ее). Если же применяется длительное перемешивание, то последующее твердение бетона в панелях — изделиях, полученных с помощью ТЭНов, идет более интенсивно, чем в аналогичных панелях, твердевших при контактном электропрогреве.

Таким образом, комплексное применение разработанных рекомендаций позволяет использовать положительное влияние длительности перемешивания шлакозольной массы на гидравлическую активность шлаков и зол, предопределяющую ускорение твердения в беспаровой среде при контактном электропрогреве и электропро-

Таблица 40. Влияние вида тепловой обработки на прочностные характеристики и влажностные усадки газшлакобетона

Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	Состав шлакозольного вяжущего в зависимости от вида золы или шлака (шлак : известь : гипс)	Состав ячеистого бетона вяжущее + наполнитель + 30% добавки крупного заполнителя	Пропаривание при 95—100° С			Контактный электропрогрев 100° С			Прогрев инфракрасными излучателями ТЭНами 100—120° С			Запаривание в автоклаве при 175° С		
			влажность, %	прочность при сжатии, МПа	усадка, мм/м	влажность, %	прочность при сжатии, МПа	усадка, мм/м	влажность, %	прочность при сжатии, МПа	усадка, мм/м	влажность, %	прочность при сжатии, МПа	усадка, мм/м
400—500	80 : (10—15) : 5	1 : 0,25 (зола, песок)	40	1,5—1	2,6—3,5	32	1,2—1	2,8—3,5	15	1,2—0,8	1,8—2	29	2—1,5	1,1—1,2
	60 : (20—35) : 5	1 : 0	38	1—0,8	2,8—3,5	33	1—0,8	2,9—3	17	0,8—0,6	1,4—2	28	1,5—1,2	0,9—1
		1 : 0,25 (зола, песок)	40	0,8—0,6	2,5—3,5	31	0,8—0,6	2,7—3,2	15	0,6—0,7	1,9—2,1	30	1,2—1	0,8—1,1
	65 : 35 портландцемент : 5	1 : 0,25 (зола, шлак)	42	1,5—1	2,8—3	30	1,2—1	2,8—3,1	18	1,2—0,8	1,3—1,5	31	2—1,5	0,9—1
700—600	80 : (10—15) : 5	1 : 0 + крупный заполнитель 30%	28	4—3,5	1,2—1,4	20	3,8—3,5	1,1—1,2	12	3,5—3	0,6—0,8	22	5—4	0,5—0,6
		1 : 0,5 (зола, шлак, песок)	35	4,5—4	2,5—2,6	28	4—3,8	2,3—2,5	14	4—3,5	1,2—1,4	25	5,5—4,5	0,7—0,9
	60 : (20—35) : 5	1 : 0,25 (шлак, зола)	37	4—3,5	2,7—2,9	30	3,5—3	2,5—2,7	15	3,8—3	1,3—1,5	24	5—4	0,9—1,1

		1:0 + крупный за- полнитель 30%	27	4—3,5	1,3— 1,5	18	4—3,5	1—1,3	12	3,5—3	0,8—1	20	5—4	0,6— 0,7
	60:35 портландце- мент:5	1:0,5 (шлак, зола)	35	5,5— 4,5	2,2— 2,5	31	5—4,5	2,2— 2,5	13	5—4	1,6— 1,8	26	6—5,5	0,8—1
800— 1000	80:(10—15):5	1:0 + крупный за- полнитель 30%	25	7,5— 5,5	1—1,3	21	7,5— 5,5	0,9— 1,1	10	7—5	0,8— 0,9	21	8,5— 6,5	0,5— 0,6
		1:0,25 (песок, шлак)	32	8—6	2,5— 2,7	29	7,3—5	2,2— 2,5	15	7,5— 5,5	1,4— 1,6	25	9—7	0,7— 0,8
	60:(20—35):5	1:0 + крупный за- полнитель 30%	24	6,5—5	1,1— 1,3	17	6,5—5	0,9— 1,1	12	6—5	0,7— 0,9	18	8—7	0,5— 0,7
		1:0,25 (шлак, зола)	35	7—5,5	2,5— 2,9	28	6—5	2,2— 2,6	15	6,5—5	1,5— 1,7	26	8,5— 7,5	0,9—1
	60:35 портландце- мент:5	1:0,5 (зола)	32	9—7	2,6— 2,8	27	8—7,5	2,3— 2,6	14	8,5—7	1,3— 1,5	24	9,5—8	0,9— 1,1
		1:0 + крупный за- полнитель 30%	22	8,5— 6,5	1,2— 1,4	18	7,5—7	1—1,1	11	8—7	0,7— 0,8	20	9—7,5	0,5— 0,7
1000— 1200	80:(10—15):5	1:0,5 (зола, шлак, песок)	34	10—8	2,5— 2,7	29	9—8	2,2— 2,5	14	9,5— 7,5	1,5— 1,6	23	12— 11	0,8— 1,2
	60:(20—35):5	1:0,25 (шлак, зола)	35	9—7,5	2,7— 2,9	28	9—7,5	2,5— 2,6	17	8,5—7	1,2— 1,5	24	11—8	0,9— 1,2
		1:0 + крупный за- полнитель 30%	22	8,5—7	1,1— 1,2	18	8,5—7	0,8—1	12	8—7	0,6— 0,7	20	10—7	0,4— 0,6
	60:35 портландце- мент:5	1:0,5 (зола, шлак)	35	11—9	2,3— 2,5	27	10—9	2,3— 2,4	15	10—9	1,3— 1,5	24	12,5— 11,5	0,8—1
		1:0 + крупный за- полнитель 30%	23	10—8	1—1,2	17	10—8	1—1,1	11	9—8	0,8—1	19	11,5— 10,5	0,5— 0,7

греве ТЭНами и получать максимальный экономический эффект.

Безавтоклавный газобетон, полученный указанным способом, обладает пониженными усадочными деформациями, повышенной трещиностойкостью и обеспечивает заданную долговечность изделий при эксплуатации.

На основании положительных результатов исследований в табл. 40 представлены отработанные оптимальные составы шлакозольных вяжущих и ячеистых бетонов на их основе, твердеющих в различных условиях и их свойства.

## 5. ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ШЛАКОВ И ЗОЛ

В результате исследований установлена возможность получения газшлакобетона и газозолобетона при запаривании в автоклаве, пропаривании в камерах, при контактном электропрогреве и при прогреве инфракрасными лучами. По прочностным показателям они не уступают ячеистым бетонам, изготовленным на портландцементе, на смешанных вяжущих и на известково-песчаном вяжущем автоклавного твердения.

Более того, варьируя составами вяжущих и бетонов, а также методами формирования ячеистой структуры, условиями и режимами твердения, доказана возможность получения равнопрочных бетонов из разнокальциевых гранулированных шлаков и пылевидных зол автоклавного и неавтоклавного твердения.

В табл. 40 представлены обобщенные результаты исследований в виде ориентировочных составов шлакозольных вяжущих и ячеистых бетонов на их основе, подвергнутых тепловой обработке в паровой и беспаровой среде. В зависимости от объемной массы прочность ячеистых бетонов колеблется в широких пределах. Газозолошлакобетон с объемной массой 400—500 кг/м<sup>3</sup> характеризуется прочностью при сжатии от 0,6 до 2 МПа. Такой материал можно использовать как теплоизоляционный в виде плит, скорлуп и т. п.

Бетон с объемной массой 600—1200 кг/м<sup>3</sup> имеет прочность при сжатии от 3 до 12,5 МПа и может быть использован как теплоизоляционно-конструктивный в ограждающих конструкциях (рис. 50).

Результаты исследований по влиянию сырья, приме-

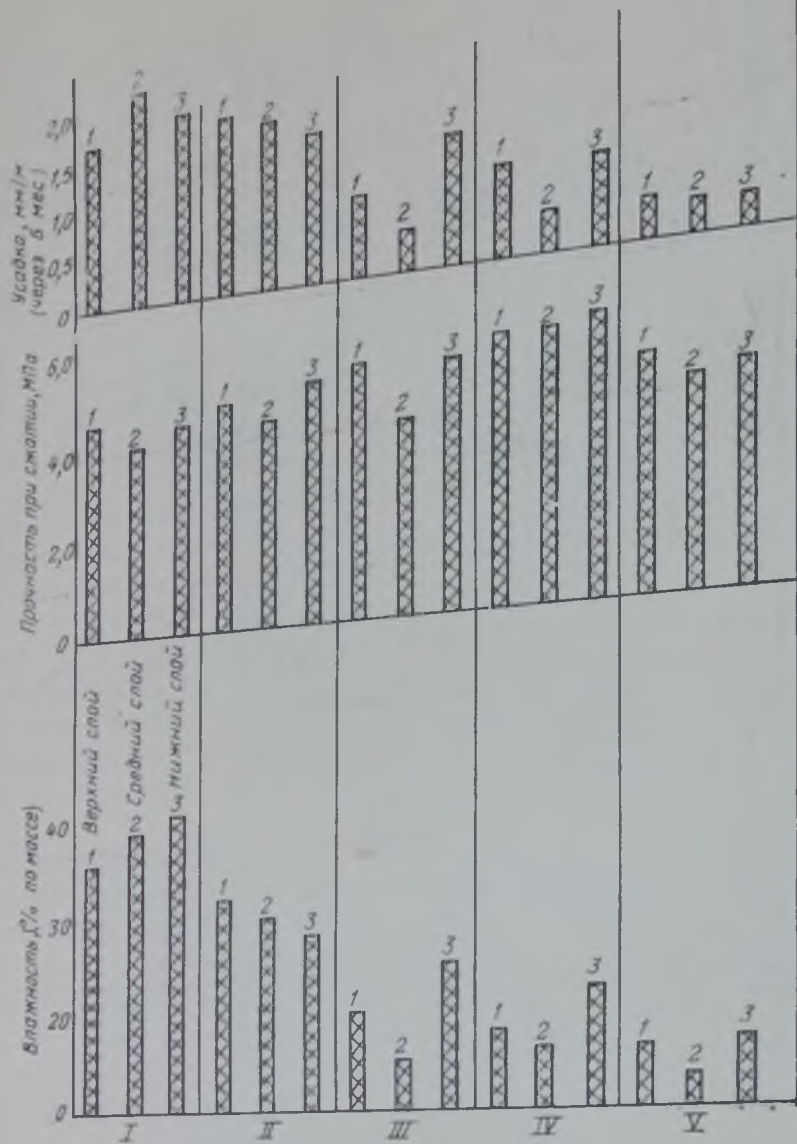


РИС. 50. ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ГАЗОШЛАКОБЕТОНА ОБЪЕМНОЙ МАССОЙ 700—750 КГ/М<sup>3</sup> В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ТВЕРДЕНИЯ

I — пропаривание при 95°С по режиму 3+12+3 ч; II — электропрогрев контактным методом по режиму 3+12+3 ч; III — пропаривание с последующей сушкой горячим воздухом 10 ч; IV — электропрогрев на образцах с технологическими пустотами по режиму 3+12+3 ч; V — прогрев инфракрасными излучателями, расположенными в пустотах

няемых способов формирования ячеистой структуры, условий твердения на прочность бетонов, представлены в табл. 41.

Призменная прочность газшлакозолобетона на 15—20% ниже прочности при сжатии, что свидетельствует о

Таблица 41. Влияние воздушно-влажной и водной среды на линейные деформации газшлакобетона<sup>1</sup>

Состав пропаренного газобетона	Начальная влажность, %	Относительная влажность воздуха 45%		Относительная влажность воздуха 65%		Относительная влажность воздуха 75%		Водная среда	
		влажность, %	усадка, мм/м	влажность по массе, %	усадка, мм/м	влажность по массе, %	усадка, мм/м	влажность по массе, %	усадка, мм/м
Газшлакобетон	0	5	0,6	8	0,5	8	0,5	48	2,8
$V/T=0,43$	5	6	0,9	7	0,8	8	0,9	47	2,6
Объемная масса 830 кг/см <sup>3</sup>	10	5	1,2	8	1,2	9	1,1	45	2,5
Прочность при сжатии 5,5 МПа	20	7	2	8	1,8	9	1,9	46	2,7
	30	6	2,6	8	2,5	9	2,3	46	2,5
Газозолобетон с добавкой 45% гранулированного шлака	0	4	0,3	5	0,3	6	0,3	39	1,0
	5	5	0,4	5	0,4	5	0,4	40	0,9
$V/T=0,28$	10	5	0,3	6	0,5	6	0,4	38	0,9
Объемная масса 950 кг/м <sup>3</sup>	20	4	0,6	5	0,6	6	0,5	39	0,8
	30	5	0,9	6	0,8	7	0,8	40	0,9
Прочность при сжатии 6 МПа									

<sup>1</sup> Результаты испытания образцов после трехмесячного хранения в указанных средах.

несколько повышенной хрупкости, особенно для запаренных бетонов. Среднее значение отношения  $\frac{R_{\text{призм}}}{R_{\text{куб}}}$  составляет 0,7—0,8 при испытании кубов и призм в воздушно-сухом состоянии. Прочность при осевом растяжении ячеистых бетонов на шлаковых и зольно-вяжущих составляет в среднем 0,1—0,2 прочности образцов при сжатии. С увеличением прочности при сжатии это отношение уменьшается. Прочность при изгибе составляет 0,22—0,18 от прочности бетона при сжатии.

Приведенные некоторые обобщенные данные показывают, что по прочности при растяжении и изгибе ячеистые бетоны из шлаков и зол не отличаются от подобных бетонов на портландцементе и извести. Как показали исследования, модуль упругости газозолошлакобетона при осевом сжатии для объемной массы  $600 \text{ кг/м}^3$  находился в пределах 1500—1300 МПа, для  $700\text{—}800 \text{ кг/м}^3$  — 2500—3000 МПа и для  $1000\text{—}1200 \text{ кг/м}^3$  модуль упругости был в пределах 5000—7000 МПа.

При сжатии длительной нагрузкой, равной 0,3 от разрушающей, деформация ползучести составила через 2 г для бетонов на бесклинкерных вяжущих  $1,2 E \cdot 10^{-3}$  и до 0,6—0,8  $E \cdot 10^{-3}$  для малоклинкерных и носила затухающий характер. Однако для успешного применения газошлакобетона в производстве строительных деталей и изделий необходимо всестороннее изучение не только его прочности, но и других основных физико-механических характеристик — водопоглощения, коэффициента размягчения, морозостойкости, усадки и набухания, коррозии арматуры, поведения бетона при воздействии на него углекислого газа и т. п. Оценка качества ячеистого бетона, его долговечность определяется характером изменений этих свойств во времени в агрессивных средах, близких к эксплуатационным условиям.

### **Изменение прочности, усадочных деформаций и набухания под воздействием агрессивных сред**

**Воздушно-влажная и водная среды.** Ячеистые бетоны в конструкциях зданий в период эксплуатации подвергаются воздействиям воздушной среды с относительной влажностью воздуха от 40 до 100%. От этих воздействий с течением времени влажность ячеистого бетона неравномерно перераспределяется по сечению изделий.



В центре изделий через 2—3 года эксплуатации, как показали наблюдения строительной лаборатории г. Красноярска, газозобетон имел влажность 17—19%, в средних слоях 10—15% и в наружных слоях 3—7 и 3—30%.

Из этого следует, что стеновую панель толщиной в 40 см можно условно разделить на 5 плоскостей, характеризующихся различным влагосодержанием (рис. 51).

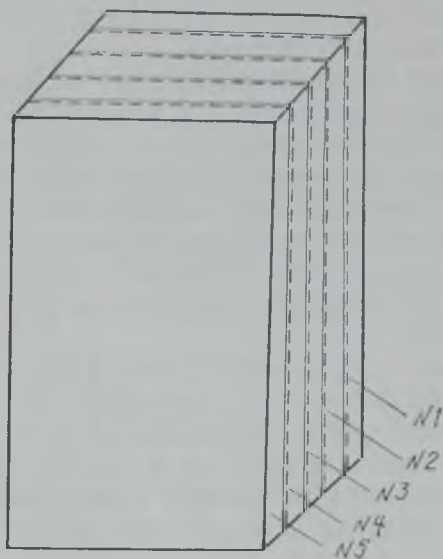


РИС. 51. УСЛОВНОЕ ДЕЛЕНИЕ СТЕНОВОЙ ПАНЕЛИ ПО СЕЧЕНИЮ НА ПЛОСКОСТИ

Неравномерное влагораспределение по слоям наблюдается и в панелях из автоклавного ячеистого бетона. Влажность средних слоев через 1—2 г. эксплуатации составляет 10—15%, наружных 3 и 26%, т. е. для средних слоев она уменьшается в два раза и наружных в 7—4 раза.

Этот важный фактор позволяет раскрыть причины деформативных изменений ячеистых бетонов, которые находятся в прямой связи с начальным влагосодержанием и

общим изменением влажности в панелях при эксплуатации в смежных слоях бетона.

В этом случае напряжения, возникающие от градиента влажностных усадочных деформаций в каждом слое, значительно возрастают вследствие перепада усадок в смежных (внутренних и наружных) слоях, что приводит к раскрытию трещин на поверхности панелей.

Таким образом, для устранения трещин надо стремиться к тому, чтобы начальная влажность ячеистого бетона автоклавного и неавтоклавного твердения была близка к сорбционной для данного материала при равномерном ее распределении по сечению изделий.

Для раскрытия природы усадки были проведены ис-

следования на ячеистых бетонах оптимальных составов с начальной влажностью 0; 5; 10; 20; 30%, хранившихся длительное время в воздушной среде с относительной влажностью 45, 65, 75% и водной среде (табл. 41).

Опыты показали, что чем выше начальная влажность, тем больше величина усадки для всех составов бетона при хранении в воздушной среде с влажностью 45, 65, 75%. Наибольшая усадка (60—70% от полной) наблюдалась при 45% влажности воздуха. При этом влажность образцов составляла 3—5% [83].

Анализируя результаты исследований, можно сделать выводы, что при эксплуатационных условиях через 2 года усадка газобетона с влажностью 30% по середине панели № 3 составила 0,6 мм/м, в промежуточных слоях № 2 и № 4 1,3—1,5 мм/м, в слое внутренней поверхности № 1—2,7 мм/м.

Деформативные изменения слоя наружной поверхности № 5 колебались в зависимости от климатических условий от —2,9 мм/м до +2,6 мм/м. Для газошлакобетона с начальной влажностью в 5—6% деформативные изменения в слоях составляли: № 3, 2, 4, 1 от 0,7 до 0,8 мм/м; № 5 — от —0,8 до +1,8 мм/м.

Деформативные изменения ячеистого бетона с добавкой 40% топливного гранулированного шлака с начальной влажностью 22% составили: для слоев № 3, 2, 4 — 0,7 мм/м; № 1 — 1,1 мм/м, № 5 — 1,2 и +0,9 мм/м.

При влажности 4—5% № 3, 2, 4, 1 — 0,3 мм/м; № 5 — 0,3 и +0,6 мм/м. Подобные результаты были получены и для ячеистого шлакобетона с добавкой дробленого керамзита.

Опытами также установлено, что трещины на образцах-кольцах образуются при величине усадочных деформаций, превышающей 0,8—1,2 мм/м для данного материала.

В водной среде при хранении образцов в течение 3—6 мес обнаруживается набухание для газобетона без сушки 2,8 мм/м, с сушкой 1,9 мм/м; для ячеистого бетона с добавкой заполнителей 1 мм/м, с сушкой 0,6 мм/м, т. е. на величину набухания оказывает влияние искусственная сушка образцов (набухание снижается на 30%) и введение структурообразующих добавок (рис. 52). Полная влажностная усадка после водного хранения составила 2,8—2,5 мм/м для газошлакобетона

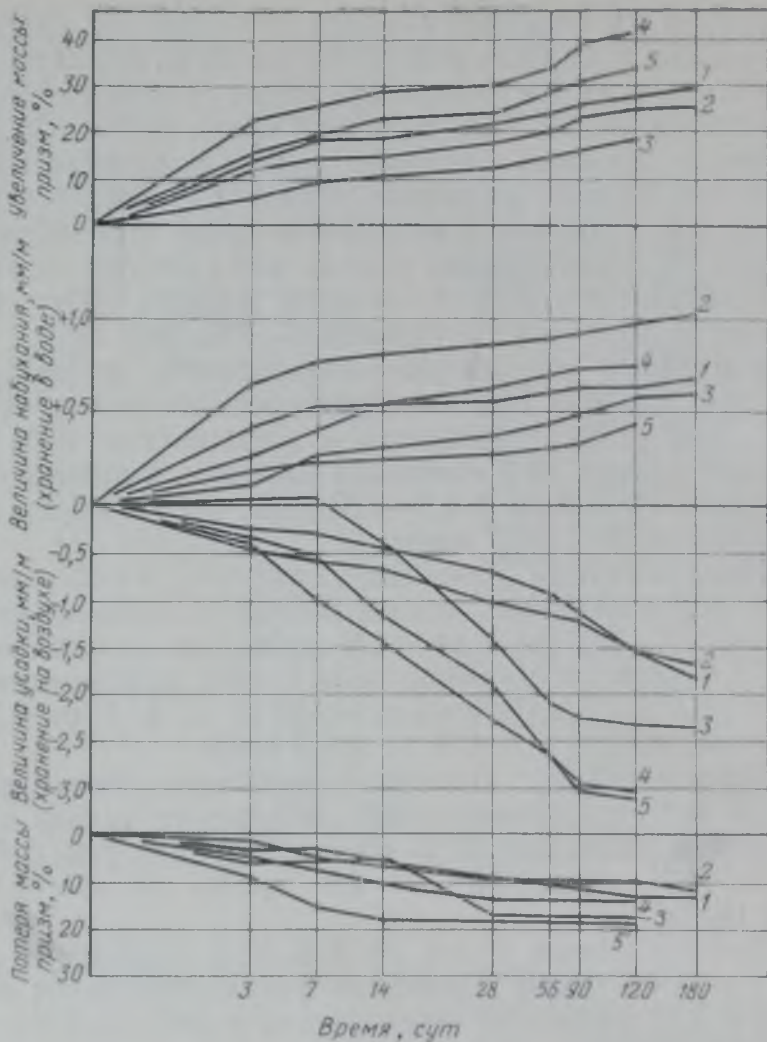


РИС. 52. ДЕФОРМАТИВНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОПАРЕННОГО ГАЗОШЛАКОВЕТОНА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ НА ВОЗДУХЕ И В ВОДЕ

1 — из топливного гранулированного шлака,  $\gamma_0=750 \text{ кг/м}^3$ ; 2 — из доменного граншлака,  $\gamma_0=750 \text{ кг/м}^3$ ; 3 — на портландцементе,  $\gamma_0=750 \text{ кг/м}^3$ ; 4 — из топливного гранулированного шлака,  $\gamma_0=450 \text{ кг/м}^3$ ; 5 — из доменного гранулированного шлака,  $\gamma_0=450 \text{ кг/м}^3$

без структурообразующей добавки и 1,1—0,8 мм/м с 40% добавки топливного гранулированного шлака.

### Переменное насыщение и высушивание

Знакопеременные деформации, возникающие при насыщении водой и высушивании ячеистого бетона, являются одним из главных факторов, определяющим долговечность конструкций. Переменным увлажнением и

высушиванием подвергаются главным образом наружные поверхности панелей, и степень их стойкости в этих условиях предопределяет стойкость их и к прочим агрессивным воздействиям (замораживание и оттаивание, проникание углекислого газа, водопоглощение и т. д.).

В опытах образцы-балочки размером  $4 \times 4 \times 16$  см после тепловлажностной обработки высушивали при  $105^\circ\text{C}$  и насыщали водой при кипячении до постоянной массы.

Усадка высушенных образцов после 1-го цикла составила для газшлакобетона без искусственной сушки 2,3 мм/м, с сушкой — 1,9 мм/м; для ячеистого бетона с добавкой гранулированного шлака и керамзита без сушки 0,9 мм/м, с сушкой — 0,7 мм/м. С увеличением количества циклов до 25 эти показатели уменьшились на 20% для газшлакобетона и на 10—12% для ячеистого бетона с заполнителями.

Таким образом, необратимые деформации для ячеистых бетонов с заполнителями в два раза меньше, чем без заполнителей, что свидетельствует о большей способности таких бетонов претерпевать деформации при изменении влажности.

Образцы-кольца из ячеистого бетона с добавкой заполнителей, прошедшие искусственную сушку, также обнаружили при переменном увлажнении и высушивании большую трещиностойкость, чем газозолошлакобетон без добавки крупного заполнителя.

Трещины на кольцах в первом случае возникли через 10 циклов, во втором — через 5—6 циклов. К этому же времени величины необратимых деформаций имели заступающий характер.

Количество циклов оказало заметное влияние и на прочность образцов при изгибе, которая снизилась к 25 циклам на 50%.

**Переменное замораживание и оттаивание.** Оценка стойкости ячеистого бетона при многократном замораживании и оттаивании производилась по изменениям прочности при сжатии, потере в массе и линейным деформациям (табл. 42).

Начальная влажность образцов составляла 48, 30, 20, 10, 5 и 0%.

Замораживание производилось при  $-18 \div 20^\circ\text{C}$  в течение 6 ч и оттаивание на воздухе при температуре  $+18 \div 20^\circ\text{C}$  в течение 12 ч.

Таблица 42. Влияние переменного замораживания и оттаивания на свойства газшлакобетона

Состав пропаренного газобетона	Начальная влажность, %	Прочность при сжатии, МПа	15 циклов			25 циклов		
			набухание, мм/м	потери в массе, %	прочность при сжатии, МПа	набухание, мм/м	потери в массе, %	прочность при сжатии, МПа
Газошлакобетон $V/T=0,43$ Объемная масса 800 кг/м <sup>3</sup>	0	4,8	0,7	0	4,7	0,9	0	4,4
	5	4,8	0,9	0	4,7	0,2	0	4,4
	10	4,3	1,2	0	4,2	1,6	5	4
	20	4	1,9	5	3,8	2,8	8	3,7
	30	3,6	3	7	3,5	3,8	10	3,3
Газозолобетон с добавкой гранули- рованного шлака 40% $V/T=0,28$ Объемная масса 900 кг/м <sup>3</sup>	0	6,7	0,4	0	6,3	0,6	0	6,2
	5	6,5	0,2	0	6,3	0,3	0	6,1
	10	6,2	0,7	0	5,8	1	0	5,5
	20	5,8	0,4	0	5	1,4	2	4,7
	30	5,5	1,8	0	4,8	2,1	2	4,5
	39	5,2	2,1	0	4,8	2,4	5	4,5

При указанной влажности газшлакобетона прочность при сжатии после 25 циклов снизилась на 35; 30; 25; 20; 10; 10% по отношению к  $R_{сж}$  в сухом состоянии. Потеря массы составила 5—3%, набухание находилось в пределах 4; 3,8; 2,8; 1,6; 1,2 и 0,9 мм/м соответственно.

Для ячеистого бетона с добавкой гранулированного шлака и керамзита снижение прочности находилось в пределах от 30 до 10% и потери массы до 3%. Набухание при указанной влажности образцов составило: 2,1; 1,4; 1; 0,6; 0,3 мм/м (рис. 53).

Величина набухания зависит от состава бетона и в большей степени от его начальной влажности. Чем выше влажность, тем больше набухание. В эксплуатационных условиях влажность ячеистого бетона распределена неравномерно по сечению изделий (см. рис. 53). Вследствие этого, как показали исследования, на долговечность бетонов наряду с изменениями прочности его при сжа-

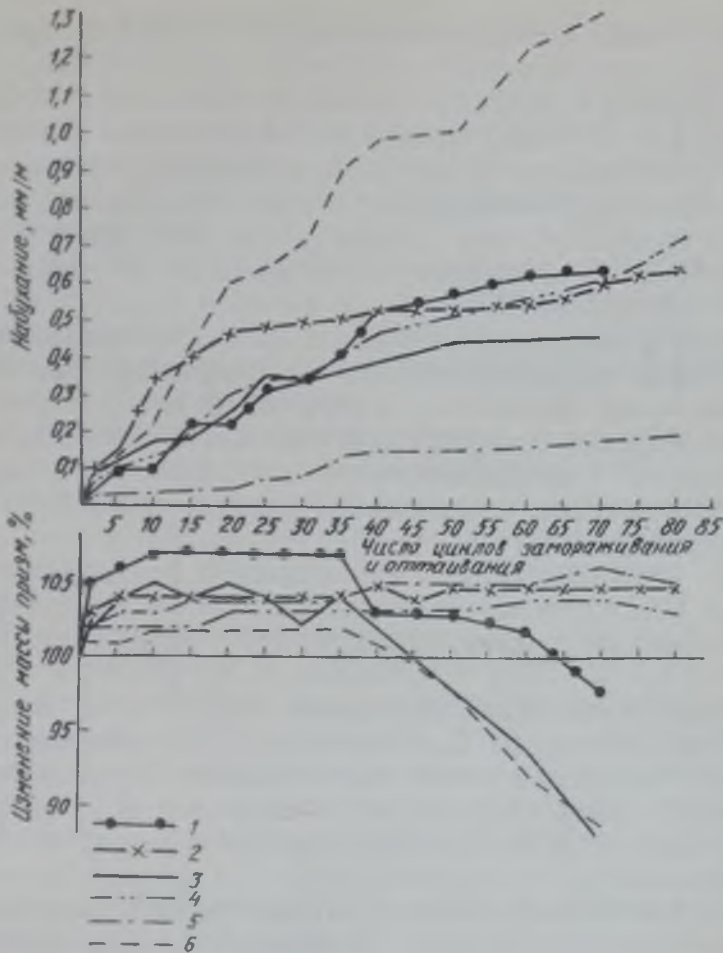


РИС. 53. ДЕФОРМАТИВНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГАЗОШЛАКОБЕТОНА ОБЪЕМНОЙ МАССОЙ 750 КГ/М<sup>3</sup> ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ШЛАКОВ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ И ОТТАИВАНИИ

1 — газобетоны на портландцементе; 2 — газобетоны на бесцементном вяжущем из доменных шлаков; 3 — газобетоны на бесцементном вяжущем из топливного шлака; 4 — газобетоны на малоцементном вяжущем из доменного шлака; 5 — газобетоны на малоцементном вяжущем из топливного шлака; 6 — газобетоны на малоцементном вяжущем из никелевого шлака. Начальные замеры массы и длины сделаны у образцов в водонасыщенном состоянии при  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$

тии в процессе переменного замораживания и оттаивания будут оказывать существенное влияние повышенные деформативные изменения за счет набухания.

По этой причине в бетоне будут развиваться большие внутренние напряжения, обуславливающие быстрое разрушение сначала наружных слоев панелей. Многократное замораживание и оттаивание постепенно приведет

к разрушению бетона и по сечению изделий с образованием сквозных трещин.

У бетонов с большими необратимыми деформациями (более 1,5—2 мм/м) трещиностойкость при замораживании и оттаивании будет пониженной. Эти выводы подтвердились при испытании образцов-колец. На образцах из газозолобетона с влажностью 30% трещины появились после 12 циклов, с влажностью 10—5% — после 25 циклов [5, 37].

**Воздействие углекислого газа на газозолошлакобетон с различной влажностью.** Во многих работах отмечается, что снижение прочности цементных бетонов и увеличение их усадочных деформаций при длительном нахождении изделий в эксплуатационных условиях обуславливается разложением углекислотой воздуха цементирующих новообразований.

При этом отмечается, что величина усадки, обусловленная воздействием углекислого газа, больше величины усадки, вызванной высушиванием материала [2, 72, 82].

Воздействию углекислого газа особенно подвержены ячеистые бетоны. Е. С. Силаенков и др. отмечают, что усадка ячеистых бетонов увеличивается с уменьшением объемной массы бетона вследствие возрастания скорости поглощения углекислого газа за счет высокой его газопроницаемости.

В работах отмечается также, что скорость карбонизации и отрицательное влияние ее на долговечность изделий зависит от возраста бетона, подвергающегося воздействию углекислого газа, концентрации газа и начальной влажности бетона.

Для исследования влияния углекислого газа на деформативные свойства и долговечность ячеистого бетона были взяты образцы с начальной влажностью 30, 20, 10, 5, 0% с добавкой заполнителя и без добавки. Карбонизировали бетон при концентрации  $\text{CO}_2$  — 95% в течение 1, 3, 7 сут. Все образцы высушивали при 105°C до постоянной массы и вновь насыщали водой до заданной влажности.

Карбонизацию производили в эксикаторах, в которых устанавливали ячеистобетонные образцы над растворами серной кислоты, обеспечивающими влажность воздушной среды, предопределяющей сохранение в бетоне требуемой влажности. Образцы с влажностью 0% поме-

щали в эксикатор с натронной известью. Углекислый газ подавали из баллона через редуктор.

Степень влияния углекислого газа определяли по изменению объемной массы бетона, прочности при сжатии и изгибе, линейных и объемных деформаций (на приборах Ле Шателье) и трещинообразования (на кольцах Лермита).

В процессе карбонизации протекают глубокие физико-химические изменения в цементирующем веществе, которые и приводят к изменениям деформативных свойств, оказывающих решающее значение на стойкость ячеистых бетонов во времени.

Эти изменения зависят от структуры ячеистого бетона, его состава и начального влагосодержания.

Повышенная скорость поглощения углекислого газа отмечается у образцов из газошлакобетона без добавки заполнителей, высушенных до постоянной массы (табл. 43).

Об этом свидетельствует увеличение объемной массы на 10% через сутки карбонизации и на 12—13% через 7 сут. Усадка бетона вследствие карбонизации через 1 сут составила 2,6 мм/м, через 3 сут — 2,9 и к 7 сут 3,4 мм/м. С добавкой гранулированного шлака или керамзита — 1,1; 1,3; 1,7 мм/м соответственно. Образцы с начальным влагосодержанием в 10% увеличились в массе на 8—10% к 7 сут карбонизации.

В первые сутки изменение в массе было незначительное вследствие параллельных процессов — поглощения углекислого газа и испарения влаги с поверхности образцов за счет их разогрева. При этом усадка составила 1,5; 2,4; 2,6 мм/м.

Образцы из ячеистого бетона с заполнителем имели усадку 0,3; 1; 1,3 мм/м через 1, 3, 7 сут карбонизации.

При влажности образцов 20 и 30% усадочные деформации составили для бетона без заполнителя 0,8; 1,5; 1,8 мм/м, с заполнителем — 0,1; 0,6; 1 мм/м.

При определении полной усадки, т. е. после высушивания карбонизированных образцов до постоянной массы, влияние начальной влажности образцов на усадочные деформации было в обратной зависимости: чем выше начальная влажность, тем больше величина полной усадки, и наоборот.

Образцы с нулевой влажностью имели полную влажностную и карбонизационную усадку 3,5 мм/м без до-



Таблица 43. Влияние углекислого газа на свойства газшлакобетона

Состав пропаренного газобетона	Начальная влажность, %	Прочность, МПа		Через 1 сут карбонизации			Через 3 сут карбонизации			Через 7 сут карбонизации			
		при сжатии	при изгибе	усадка, мм/м после карбонизации	прочность, МПа		усадка, мм/м после карбонизации	прочность, МПа		усадка, мм/м		прочность, МПа	
					при сжатии	при изгибе		при сжатии	при изгибе	после карбонизации	полная	при сжатии	при изгибе
Газшлакобетон $V/T=0,43$ Объемная масса 810 кг/см <sup>3</sup>	0	4,7	1,4	2,6	4,6	1,3	2,9	4,3	1,2	3,4	3,6	4,3	1,1
	10	4,3	1,4	1,5	4	1,2	2,4	3,8	1	2,6	4,5	3,6	0,9
	30	3,8	1,2	0,8	3,5	1	1,5	3,3	0,8	1,8	6,1	3	0,6
Газозолобетон с до- бавкой 40% гранулиро- ванного шлака $V/T=0,28$ Объемная масса 910 кг/м <sup>3</sup>	0	5,2	1,7	1,1	5	1,6	1,3	4,5	1,5	1,7	1,8	4	1,3
	10	4,8	1,5	0,3	4,5	1,1	1	4,2	1	1,3	2,1	3,7	0,9
	30	4,5	1,4	0,1	4	1,1	0,6	3,8	0,9	1	2,7	3,5	0,7
Газозолобетон с до- бавкой 35% керамзита $V/T=0,25$ Объемная масса 830 кг/м <sup>3</sup>	0	6,5	2,3	1	6	1,9	1,4	5,5	1,7	1,8	2,6	5,1	1,6
	10	6	2	0,5	5,4	1,5	1	5	1,5	1,2	2,3	4,8	1,3
	30	5	1,8	0,2	5	1,5	0,5	4,4	1,2	1	2,8	4,3	0,9

бавки заполнителя и 1,8 мм/м с добавкой, после 7 сут карбонизации: при влагосодержании 10% — 4,5 и 2,1 мм/м; при влажности 20—30% — 6,1 и 2,7 мм/м.

В процессе карбонизации трещины были обнаружены только на сухих образцах. При высушивании карбонизированных образцов наибольшее количество трещин было отмечено на образцах-кольцах из газошлакобетона с влажностью 20 и 10%. Объемные изменения на приборе Ле Шателье показали ячеистые бетоны без добавки заполнителя. При этом большая величина (до — 1 см) характерна для карбонизированных образцов с начальной влажностью 20%.

Таким образом, при карбонизации бетона с повышенной начальной влажностью поглощение углекислого газа протекает весьма интенсивно, однако без видимых существенных деформативных изменений. Это можно объяснить образованием первичных соединений — бикарбонатов, которые в жидкой фазе не приводят к деструктивным процессам. При высушивании образцов бикарбонаты переходят в карбонаты кальция, и чем выше была начальная влажность бетона, тем степень поглощения  $\text{CO}_2$  больше, что объясняется повышенной растворимостью  $\text{CO}_2$  в водной среде (до 1,5 л/л). Об этом свидетельствует также увеличение массы сухих карбонизированных образцов (на 12—13%) и большие усадочные деформации, которые в два раза выше, чем у образцов, карбонизированных в сухом состоянии.

Прочностные характеристики карбонизированных образцов снизились на 10—15%. Причем конечная прочность карбонизированных образцов в сухом состоянии на 15% выше образцов, карбонизированных во влажном состоянии.

Исследования показывают, что степень связывания  $\text{CO}_2$  зависит от влагосодержания бетона, а также и от его состава. Учитывая неравномерное распределение влаги по сечению изделий, можно сделать вывод, что карбонизация наружных слоев панели (с влажностью от 3 до 30%) и внутренних (с влажностью 3—5%) приводит к существенной разнице усадочных деформаций в смежных слоях.

С целью снижения усадочных деформаций от воздействия углекислого газа необходимо покрывать наружные поверхности панелей защитным слоем или вво-

дить в состав ячеистого бетона дополнительное количество извести от 30 до 50 кг/м<sup>3</sup> бетона.

Уменьшить деформативные изменения неавтоклавного ячеистого бетона в процессе его эксплуатации можно путем искусственной карбонизации совместно с сушкой.

Для этого, не прерывая тепловлажностной обработки после 10 ч пропаривания, в камеру с образцами вместо пара подавали углекислый газ и горячий воздух, нагретый до 150°С в течение 4 ч. Карбонизированные образцы с влажосодержанием в 5—6% помещали в воздушно-влажные условия с относительной влажностью воздуха 60—65%. Через 6 мес нахождения образцов в указанных условиях усадочные деформации газозолошлакобетона составили 0,5 мм/м и ячеистого бетона с добавкой гранулированного шлака 0,3 мм/м, т. е. в два раза меньше, чем усадка высушенных ячеистых бетонов, но не обработанных углекислым газом.

Газозолобетон, обработанный после пропаривания только углекислым газом, имел влажность 15—18% и усадку после 6 мес нахождения в воздушно-влажных условиях 1,8 мм/м для бетона без добавки заполнителя и 0,8 мм/м с добавками крупного заполнителя.

Таким образом, для получения ячеистых бетонов с повышенной трещиностойкостью можно решать вопрос комплексно, совмещая искусственную сушку изделий и их карбонизацию.

**Поведение газозолобетона с равновесной влажностью в условиях воздействия на него углекислого газа.** В работе исследовалось влияние углекислого газа на изменение строительно-деформативных свойств газозолобетона при равновесной его влажности в 7—8%. Образцы карбонизировались в течение 3—6—12—24 ч. Степень влияния углекислого газа определяли по изменению объемной массы бетона, прочности при сжатии и при изгибе, модуля упругости, линейных деформаций.

Исследовали три состава газозолобетона: без добавки извести и с добавками 25 и 50 кг/м<sup>3</sup> бетона.

Результаты определений даны в табл. 44 и 44а. Как показали исследования, в результате карбонизации образцов увеличивается объемная масса на 12—15%. Особенно для состава с содержанием извести 50 кг/м<sup>3</sup>, а прочность при сжатии и модуль упругости резко снижаются (на 30—40%) в первые сутки карбонизации — через 3—6 ч.

Таблица 44. Свойства пропаренного газозолобетона до карбонизации

Состав газозолобетона (расход материалов в кг/м <sup>3</sup> )	Газозолобетон с влажностью 7—8% (по массе)				Газозолобетон в сухом состоянии				
	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	прочность, МПа		Модуль упругости, МПа	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	прочность, МПа		Модуль упругости, МПа	Полная влажностная усадка, мм/м
		при сжатии	при изгибе			при сжатии	при изгибе		
1. Портландцемент — 200 Зола — 600 Гипс — 10 CaCl <sub>2</sub> — 4 Алюминиевая пудра — 0,7	980	5,4	1,7	2600	917	6,5	2,2	3000	2,93
2. Портландцемент — 175 Зола — 600 Известь — 25 Гипс — 10 CaCl <sub>2</sub> — 4 Алюминиевая пудра — 0,7	1000	5,8	2	3000	920	7,2	2,5	3400	2,71
3. Портландцемент — 150 Зола — 600 Известь — 50 Гипс — 10 CaCl <sub>2</sub> — 4 Алюминиевая пудра — 0,7	970	5,8	2,3	3100	920	7	2,8	3500	2,74

В последующие часы карбонизации прочность при сжатии повышается, а прочность при изгибе и модуль упругости остаются почти без изменений (рис. 54).

В первые часы карбонизации усадочные деформации достигают величины в 1—2 мм/м. Через 3 сут карбонизации и высушивания до постоянной массы образцов состава № 1 усадочные деформации достигают 3,7 мм/м. Газозолобетон с добавкой извести 25 кг/м<sup>3</sup> дал усадку

Таблица 44а. Свойства пропаренного газозолобетона после карбонизации

Номера составов	Время карбонизации	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	Прочность МПа		Температура образца, °С	Усадка, мм/м
			сжатие	изгиб		
1	После 3 ч	1050	4	0,6	40	0,22
2		1040	4,7	1	52	Набухание 0,2
3		1020	4,5	1,2	82	Набухание 0,32
1	После 6 ч	1090	4,2	0,6	32	1,05
2		1090	4,7	0,9	44	0,35
3		1110	4,9	1,2	49	0,87
1	После 24 ч	1140	5,2	0,7	24	1,59
2		1110	5,9	0,9	24	1,09
3		1140	5,5	1,1	24	1,69
1	После 3 сут	1152	5,2	0,7	24	1,98
2		1128	6	1	24	1,26
3		1155	5,6	1,2	24	1,89

Примечания. 1. Расход материалов в составах 1, 2, 3 приведен в табл. 44. 2. Усадка только карбонизационная.

1,8 мм/м, а с добавкой извести 50 кг/м<sup>3</sup> — 2,4 мм/м. В то же время полновлажностная и карбонизационная усадка газозолобетона, имевшего до карбонизации начальную влажность 20—30%, составила 6,1 мм/м, что в полтора-два раза выше усадки газозолобетона с равновесной влажностью.

Физико-химические исследования показали, что в ходе карбонизации происходит разложение гидросиликатов кальция с замещением их агрегатами тонкокристаллического кальцита, сцементированного аморфной водной кремнекислотой. Реакция карбонизации является экзотермической, о чем свидетельствует повышение температуры бетонов в первые сроки после впуска углекислоты.

Судя по увеличению температуры образцов при введении добавки свободной гидрокиси кальция в исходную смесь, карбонизация Са(ОН)<sub>2</sub> также сопровождается дополнительным выделением тепла в количестве,

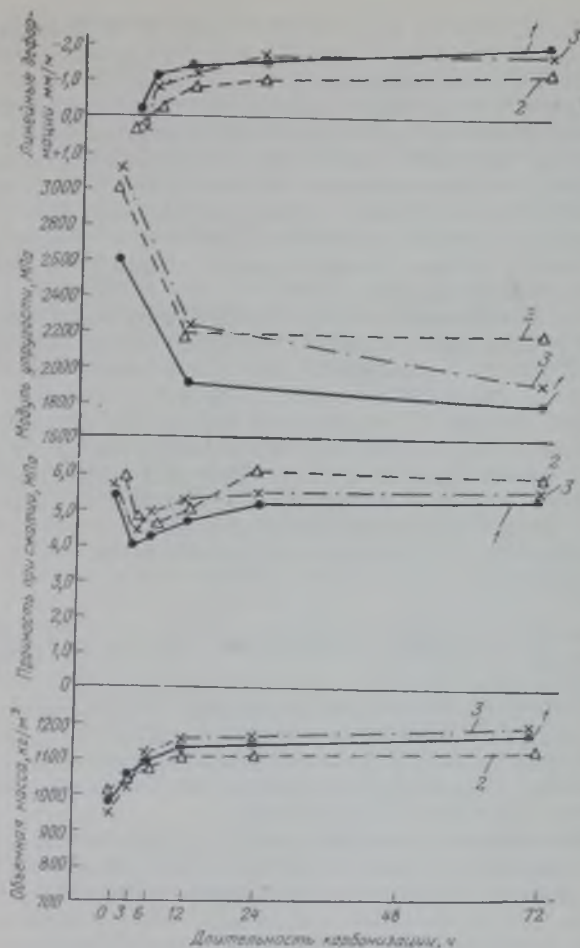


РИС. 54. ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ГАЗОШЛАКОБЕТОНА В ПРОЦЕССЕ КАРБОНИЗАЦИИ. СОСТАВЫ 1, 2, 3 ИЗ ТАБЛ. 44

превышающем тепловыделение при карбонизации гидросиликатов кальция.

Микроструктура продуктов карбонизации существенно различна. При замещении гидросиликатов кальция возникают мелкие кристаллики кальцита с размером

1—3 мкм. За счет вовлечения в реакцию дополнительно введенного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  образуются более крупные кристаллы  $\text{CaCO}_3$  с поперечником до 20—30 мкм.

Такие результаты предопределяют возможность снижения усадочных деформаций в газозолобетоне путем введения дополнительного количества извести, которая, вступая во взаимодействие с углекислым газом, образует крупные кристаллы карбонатов кальция. При оптимальном сочетании количества добавок и степени карбонизации бетонов можно создать системы с пониженными деформациями.

Таким образом, основным технологическим приемом, обеспечивающим улучшение деформативных свойств изделий из газозолошлакобетона и повышение их долговечности, является тепловая обработка с последующей сушкой бетона до равновесной влажности. Равновесная влажность в изделиях, изготовленных в заводских условиях, может быть достигнута при использовании контактного метода электропрогрева изделий с технологическими пустотами или при совмещенном процессе тепловлажностной обработки и сушки генераторами инфракрасного излучения.

## **Защита поверхности стеновых изделий от атмосферного влияния**

Газобетон интенсивно поглощает влагу из окружающей среды и довольно медленно ее отдает.

Поэтому необходимо соответствующим образом защищать его наружную поверхность от увлажнения и прочих атмосферных воздействий.

Влажность изделий из газозолошлакобетонов во многом зависит от способа защиты их наружной поверхности, которая осуществляется самыми различными способами. Она может быть выполнена путем нанесения на поверхность ячеистого бетона защитного слоя из цементного раствора, из поризованного раствора, путем окраски поверхности различными гидрофобными красками: цементными, перхлорвиниловыми, поливинилацетатными и др. С 1961 г. применяется офактуривание панелей из газобетонов каменными дроблеными материалами.

Однако различные виды защитных слоев по-разному влияют на влажность конструкций из газозолошлакобетона.

В конструкциях, не имеющих плотных защитно-отделочных слоев, влажность бетона довольно быстро снижается до сорбционной. В стенах с облицовкой цементным раствором влажность под плотным слоем значительно выше, чем посередине панели. Это говорит о том, что на границе раствор — ячеистый бетон скапливается влага. В этом случае высыхание стены осуществляется в основном со стороны комнаты, что ведет к повышению относительной влажности воздуха внутри помещений [41, 42].

С накоплением влаги в стенах, оштукатуренных плотным раствором, ячеистый бетон размораживается, плотный слой теряет сцепление с бетоном и отпадает. Кроме того, совместная работа защитного слоя и ячеистого бетона затруднена их различными деформациями.

Благоприятнее сказывается на влажностном режиме стен фактурный слой из поризованного раствора и штукатурка сложным раствором.

Отделка бетона каменными дроблеными материалами повышает его трещиностойкость в процессе изготовления и эксплуатации.

Отсутствие трещин объясняется тем, что перепад деформаций между поверхностным и внутренним слоями ячеистого бетона у офактуренных панелей меньше, чем у неофактуренных, потому что в поверхностном слое офактуренных панелей имеется крупный заполнитель.

В Чехословакии, Польше, Швеции и других странах защита наружных поверхностей газобетонов осуществляется тонкослойной штукатуркой, полимерными материалами, дробленным камнем, мозанкой, керамическими плитками.

Рельеф на наружной поверхности панелей создается следующим способом: на дно формы укладывают гравий, закрывают его пластмассовой пленкой и затем заливают ячеистой массой.

Чехословацкими исследователями установлено, что наименьшая влажность ячеистобетонных стен наблюдается при отсутствии отделочно-защитных покрытий. На втором месте стоят тонкослойные набрызговые отделки с применением поливинилацетатной эмульсии, и на последнем месте — мокрые штукатурки.

В гг. Донецке, Люберцах, Новокузнецке и др. защиту наружной поверхности осуществляют созданием уплотнительного слоя (при формировании «лицом»



вверх). «Горбушку» при литевой технологии срезают на 1,5—2 см выше борта формы, а затем этот слой уплотняют до уровня бортов валком, вращающимся со скоростью 200—300 об/мин. При использовании метода вибровспучивания операция по срезке «горбушки» не производится.

В результате образуется плотный, гладкий и прочный слой. При уплотнении верхнего слоя можно вводить в него гидрофобные добавки и красители. Прочность уплотненного слоя газозолобетона после уплотнения возрастает в 1,5—2 раза, а объемная масса находится в пределах 1700—1800 кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемость газозолобетона В-4, коэффициент паропроницаемости — 0,014 г/м·ч.

В г. Ангарске наружная поверхность газозолобетона отделяется плотной или поризованной бетонной фактурой толщиной 3—4 см лицом «вниз». Там же применяется масляная покраска, гидрофобизация жидким ГКЖ-94.

В Швеции для наружных покрытий применяют акриловые смолы с введением мелкозернистого наполнителя, а также латексные составы.

Таким образом, защита наружной поверхности панели из газозолошлакобетона должна отвечать следующим основным требованиям: быть достаточно паропроницаемой, не препятствующей высыханию бетона, и в то же время быть достаточно гидрофобной, не допускающей увлажнения панели извне.

С целью изучения вопроса карбонизации офактуренных стеновых газозолобетонных панелей исследовался состав зоны контакта фактурного слоя, выполненного из цветного тяжелого бетона, с ячеистым бетоном в стеновых панелях.

Изучение проведено петрографическим методом, в прозрачных шлифах, изготовленных перпендикулярно зоне контактов.

Установлено, что ячеистый бетон контактной зоны по своему составу идентичен бетону центральных участков панелей, но отличается степенью карбонизации продуктов твердения.

Толщина зоны карбонизации колеблется в широких пределах — от 1—1,5 до 20—25 мм, определяемых продолжительностью хранения панелей на воздухе до отбора проб.

Из этих данных видно, фактурный слой не является сколько-нибудь надежной защитой против карбонизации, хотя и несколько замедляет ее.

Для тонкого слоя, непосредственно примыкающего к фактуре, характерно полное замещение гидросиликатов кальция агрегатами тонкозернистого (1—2 мм в поперечнике) кальцита, цементирующегося аморфной водной кремнекислотой. По мере углубления степень карбонизации снижается. Отмеченное изменение фазового состава, цементирующего вещества ячеистого бетона, сопровождающееся увеличением объема твердой фазы, отрицательно действует на сцепление бетона с фактурным слоем и способствует отслаиванию и отпаданию последнего при эксплуатации.

### **Защита арматуры от коррозии**

При применении армированных газобетонов для ограждающих конструкций, изготовленных из традиционных или шлакозольных материалов, необходимы специальные меры по защите арматуры. Кроме того, необходимо применять антикоррозионные обмазки. В настоящее время существует много видов обмазок.

Наиболее эффективны и дешевы цементно-битумные горячая и холодная мастики, а также цементно-казеиновая обмазка с нитритом натрия. Цементно-битумное покрытие обладает эластичностью и длительным сроком использования. Недостатком такого покрытия является малая огнестойкость и вредное действие паров битума и растворителя (у холодной мастики) и высокая температура смеси (у горячей мастики).

Основным недостатком цементно-казеиновой обмазки является относительно короткий срок службы обмазочной массы и ее хрупкость.

По результатам испытания на сцепление наиболее пригодными с этой точки зрения являются цементно-казеиновая обмазка и цементно-битумная холодная мастика.

Цементно-битумная горячая мастика из-за чрезмерной толщины обмазочного слоя на металле вызывает значительное ослабление его сцепления с бетоном; поэтому при нанесении мастики на поверхность арматуры необходимо точно выдерживать температурный режим.

Из других видов цементных покрытий следует отме-

тить эффективность некоторых образцов на основе полимерных материалов, например цементно-полистирольных, цементно-поливинилацетатных, этило-битумно-цементных, латексно-цементных суспензий и др.

Образки на основе жидкого стекла для армированного ячеистого бетона непригодны, так как не обеспечивают надежной защиты, а иногда даже способствуют усилению коррозии. Закладные части защищают горячим цинкованием. Применяется и цементно-лаковая защита.

Установлено, что коррозия арматуры в безавтоклавном газозолошлакобетоне развивается медленнее, чем в автоклавном, и после года испытания проявляется в виде поверхностной пленки толщиной не более 0,007 мм.

Это объясняется тем, что при тепловой обработке при температуре не выше 100°С показатель рН жидкой фазы бетона сохраняется в пределах 12,5, тогда как при автоклавной обработке (при температуре 175°С) рН среды снижается до 9,5—9,2.

Использование высококальциевой пылевидной золы и молотых гранулированных шлаков вместо молотого или немолотого песка улучшает коррозионную стойкость ячеистых бетонов. Кроме того, учитывая длительное воздействие атмосферных условий и довольно большую проницаемость газозолобетона, необходимо применять действенные меры по защите арматуры от коррозии.

Для предотвращения коррозии арматуры нужно, чтобы влажность ячеистого бетона была на уровне сорбционной. Поэтому снижение технологической влажности, создание благоприятных условий для высыхания и наземная защита изделий из газобетона являются наиболее важным мероприятием.

Толщина защитного слоя бетона в конструкциях из ячеистого бетона установлена сейчас  $2 \pm 0,5$  см.

Даже при соблюдении проектных требований к толщине защитного слоя арматура в стеновых панелях попадает в наиболее агрессивную зону чередующегося увлажнения и высыхания при действии косых дождей. В панелях стен жилых зданий рекомендуется толщина защитного слоя арматуры, равная  $3 + 0,5$  см.

## ГЛАВА IV. ЗАВОДСКОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ШЛАКОВ И ЗОЛ

### 1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ В ЗАВОДСКИХ УСЛОВИЯХ ПО РЕКОМЕНДАЦИИ МИСИ ИМ. В. В. КУЙБЫШЕВА

Результаты лабораторных исследований, выполненных в МИСИ им. В. В. Куйбышева, были опробованы при выпуске опытных партий на различных заводах страны.

Испытания шлакозольных изделий и конструкций, изготовленных в опытно-промышленных условиях, подтвердили эффективность предлагаемых технологических приемов и целесообразность внедрения их в производство.

На Кураховском заводе ЖБИ, Сафоновском комбинате производственных предприятий была опробована технология изготовления теплоизоляционного газозолобетона, твердеющего по методу контактного электропрогрева.

Изготовление изделий в производственных условиях осуществлялось следующим образом. Дозирование компонентов велось по массе. Перемешивание составляющих газобетона осуществляли в виброгазобетонномешалке в течение 2—3 мин.

Удельная поверхность золы и известково-зольного вяжущего находилась в пределах 2500—3000 см<sup>2</sup>/г. На Сафоновском комбинате производственных предприятий вяжущее и золу подавали непосредственно в газобетонномешалку.

Вспучивание газомассы осуществлялось по обычной литьевой технологии. Составы и характеристики газомассы, режимы прогрева и свойства полученных бетонов приведены в табл. 45.

Прочность газобетонов контролировали на образцах размером 10×10×10 и 4×4×16 см, выпиленных из плит различных размеров (6,0×1,5×0,2 м; 6,0×0,75×0,2 м; 6,0×1,0×0,4 м). После формования изделия выдерживали перед термообработкой в течение 2—3 ч.

Электропрогрев изделий осуществлялся по схеме, приведенной на рис. 43. Нижним электродом служил поддон формы, верхним служила металлическая сетка

Т а б л и ц а 45. Характеристика газобетона из опытных партий изделий, полученных термообработкой контактным электропрогревом

Состав газобетона, кг/м <sup>3</sup>					Вид тонкодисперсного заполнителя, удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Характеристика газомассы		Расплав по Суттарду, см	Влажность бетона после прогрева % по массе	Объемная масса в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии в сухом состоянии, МПа
цемент	известь	тонкодисперсный заполнитель (зола)	гипс двухводный	алюминиевая пудра		В/Т	Температура, °С				
75	110	265	—	0,9	Песок молотый, 2500	0,44	69—78	13			
250	10	210	—	0,9	То же	0,42	46—54	13	23,5	505	0,8
50	110	300	23	0,60	Молотая золошлаковая смесь 2900	0,433	66—75	10	22	530	1,6
—	135	287	23	0,60	То же	0,43	75—80	10	22	525	1,2
75	110	265	—	0,65	»	0,44	50—63	13	20,5	520	1
68	112	243	23	0,60	»	0,42	63—75	12	18	515	1,2
75	110	250	23	0,9	Молотая отвальная зола Дорогобужской ГРЭС, 2600	0,48	28—51	18	20	470	1
50	110	275	23	0,9	То же	0,46	26—48	17	21	495	0,9
—	130	350	5	0,9	Песок молотый, 2500	0,6	—	22—24	32	470	1,3

П р и м е ч а н и я: 1. Активность газомассы находилась в пределах 14,5—17,5%. 2. Режим электропрогрева 2+10 и 3 ч сушки.

с размером ячейки  $100 \times 100$  мм, уложенная на слой токопроводящих материалов (измельченного металлургического кокса или строительного песка, пропитанном раствором хлористого кальция или натрия). Для предотвращения замыкания между верхним электродом и бортами формы последние изолировались прокладками рубероида либо незначительно приоткрывались.

В процессе электропрогрева происходит непрерывное испарение влаги, в то время как при пропаривании и запаривании изделие первоначально поглощает воду, а затем частично ее теряет. Влажность электропрогреваемых изделий поэтому несколько ниже влажности пропаренных.

С целью предотвращения преждевременного пересушивания изделий и поддержания определенной величины электропроводности бетона изделие после укладки электрода покрывалось паронепроницаемой полиэтиленовой пленкой.

Электропитание осуществлялось от силовой сети переменного тока напряжением 220 В через понижающий трансформатор мощностью 20 кВа при напряжении вторичной обмотки 60—65 В. Опыт прогрева теплоизоляционных бетонов, укрытых паронепроницаемой пленкой, показал, что при замедлении испарения влаги из бетона значительно ограничивается скорость возрастания омического сопротивления.

Так, рост удельного омического сопротивления ( $\rho$ ) в бетоне без укрытия в 5—6 раз быстрее, чем в изделиях, укрытых пленкой, где величина  $\rho$  увеличивается незначительно (через 12—14 ч составляет 1250—1500 Ом·см). Электропрогрев газозолобетона производился в течение необходимого заданного режима при постоянном напряжении 60—80 В.

В то же время рост омического сопротивления газозолобетона объемной массы  $900 \text{ кг/м}^3$ , прогреваемого без укрытия на Ангарском заводе ЖБК, резко возрастал. Электропрогрев в этом случае производится при ступенчатом увеличении напряжения со 127 до 220, 380 и даже 500 В.

Анализ данных табл. 45 показывает, что неавтоклавный теплоизоляционный ячеистый бетон, изготовленный на песчаном шламе, в силу незначительной реакционной способности заполнителя при температуре 95—

100° С не отвечает требованиям по прочности, предъявляемым стандартом к данному виду бетонов.

В то же время ячеистый бетон, изготовленный на золе, отличается ускоренным ростом прочности в сравнении с песчаным бетоном за счет повышенной реакционной способности пылевидных зол в условиях тепловой обработки.

Газозолобетоны, твердевшие в течение 8—12 ч, обладают прочностью в пределах 0,8—1,6 МПа, что отвечает требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным ячеистым бетонам из традиционных материалов.

Однако достижение требуемой прочности явилось не единственной задачей, предопределившей применение контактного электропрогрева при производстве теплоизоляционных золобетонов.

Не менее важным фактором при выборе вида термообработки являлась возможность снижения конечной влажности изделий, в значительной степени определяющей теплоизоляционные и деформативные свойства газозолобетонов.

Применение контактного электропрогрева позволяет снизить влажность ячеистых бетонов до 24—27%.

С целью дальнейшего снижения влажности электропрогретого теплоизоляционного золобетона и приближения ее к стандартной (10—15%) была применена сушка изделий по окончании изотермической выдержки. Она осуществлялась при удалении паронепроницаемой пленки, препятствовавшей интенсивному испарению влаги с поверхности изделий.

Продолжительность сушки составляла 2—3 ч. Сушка газозолобетона в течение указанного времени позволила снизить его влажность еще на 5—10%.

Изучение характеристик золобетонов низкой объемной массы, полученных при выпуске опытных партий, позволило выявить оптимальные составы бесклинкерных и малоклинкерных бетонов на основе зол и шлаков и рекомендовать режимы тепловлажностной обработки, обеспечивающие достижение максимальной прочности и минимальной влажности формируемых изделий на указанных предприятиях. Основные характеристики режимов электропрогрева теплоизоляционных изделий, осуществленного в производственных условиях, позволяют заключить, что средний расход электроэнергии составляет около 40 кВт·ч/м<sup>3</sup>, что в 1,5—2 раза меньше

затрат электроэнергии при термообработке газозобетона объемной массы  $950 \text{ кг/м}^3$  на Ангарском заводе.

Таким образом, укрытие прогреваемых изделий паронепроницаемыми пленочными материалами позволило производить электропрогрев при постоянном напряжении в 60 В, что достигается замедленным возрастанием удельного омического сопротивления газобетона вследствие значительного уменьшения испарения влаги. Значение  $\rho$  в среднем на протяжении всего времени изотермической выдержки не превышало 800—1200 Ом·см.

Кроме того, укрытие паронепроницаемой пленкой позволяет значительно повысить равномерность распределения температур по сечению изделия, что предотвращает недопустимые температурно-влажностные градиенты по сечению изделий.

Применение накладного электрода большой площади обеспечивает получение малых плотностей тока ( $0,3—0,7 \text{ А на } 1 \text{ дм}^2$ ), и это обеспечивает большую равномерность прогрева бетона.

Предотвращение обезвоживания газобетона, а также создание под пленкой паровлажностной среды способствует более полному протеканию процессов гидратации в материале и позволяют выдерживать режим термообработки в заданных пределах.

А возможность осуществления сушки изделий после тепловлажностной обработки позволяет снизить конечную влажность газобетона до 17—20%.

При электропрогреве под пленкой отпадает необходимость в периодическом поливе токопроводящего слоя верхнего накладного электрода раствором  $\text{CaCl}_2$ , так как песок, находясь под пленкой, постепенно увлажняется конденсатом, образующимся при испарении влаги из газобетона.

Доменные гранулированные шлаки Чусовского металлургического завода были применены при выпуске опытной партии армопенобетонных изделий на Березниковском ЖБК Пермской области.

Исследования проводили с целью замены клинкерного цемента бесклинкерным или малоклинкерным вяжущим в производстве этих изделий. Вяжущее имело следующий состав:

- молотый гранулированный шлак — 80%;
- известь негашеная (активностью 72%) — 15%;
- двуводный гипс — 5%.



Тонкость помола характеризовалась остатком на сите 0085—20%. Соотношение вяжущего и заполнителя (песка) составляло 1:1. На 1 м<sup>3</sup> ячеистой массы вводили до 80 кг цемента.

В качестве пенообразователя применялся смолосапониновый раствор с плотностью 1,02. Ячеистую массу готовили в трехбарабанной пенобетономешалке. Перед термообработкой изделия выдерживали в течение 17 ч. Армопенобетонные изделия обрабатывали в автоклаве при 175°С по режиму 3+8+3 ч.

Полученные изделия обладали прочностью в пределах 3,8—4,5 МПа во влажном состоянии сразу после запаривания. При высушивании пеношлакобетона объемная масса составила 780—740 кг/м<sup>3</sup> и прочность повысилась на 10—15%. Полученные результаты соответствовали данным армопенобетона, изготовленного на основе клинкерного цемента. Замена клинкерного цемента шлаковым вяжущим позволяет высвободить до 150—200 кг портландцемента 1 м<sup>3</sup> изделий.

На основе результатов лабораторных исследований по снижению влагосодержания в газозолобетоне, уменьшению усадочных деформаций и повышению трещиностойкости был предложен следующий комплекс технологических мероприятий при использовании высококальциевых и сверхкальциевых зол.

1. Устранение неравномерного изменения объема ячеистого бетона вследствие длительной гидратации свободных СаО за счет использования предварительно обработанной высококальциевой золы.

2. Снижение водотвердого отношения путем поризации золобетонной массы в смесительном агрегате или введением структурообразующих добавок в количестве 35—40% (по массе).

3. Уменьшение температурно-влажностных напряжений устройством технологических пустот в центральном слое панели.

4. Снижение конечной влажности в панелях путем совмещения процессов изотермического прогрева и сушки генераторами инфракрасного излучения.

С целью производственного опробования предлагаемой технологии на заводе ЖБИ в Ангарске были выпущены опытные партии панелей из неавтоклавного газозолобетона с использованием указанного комплек-



РИС. 55. СТЕНОВАЯ ОПЫТНАЯ ПАНЕЛЬ ИЗ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗО-БЕТОНА

са мероприятий на золе Красноярской и Иркутской ТЭЦ, из которых в последующем был построен экспериментальный дом.

Стеновые панели изготовляли для дома серии I-335кс с оконным проемом и сплошные (рис. 51).

Тепловлажностную обработку проводили методом контактного электропрогрева, а также генераторами инфракрасного излучения.

Результаты производственного опробования показали, что оптимальное время перемешивания составило

Таблица 46. Основные физико-механические характеристики опытной партии стеновых панелей из газозолобетона, изготовленных в Ангарске на основе золы Красноярской ТЭЦ при длительном перемешивании формовочной массы на бегунах М-112

Время перемешивания на бегунах, мин	Водотвердое отношение	Температура газомассы, °С	Удельная поверхность смеси, см <sup>2</sup> /г	Содержание СаО + MgO в газобетоне, %		После электропрогрева			В сухом состоянии		Водопоглощение, %
				до электропрогрева	после электропрогрева	объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	влажность, % по массе	прочность при сжатии, МПа	объемный вес, кг/м <sup>3</sup>	прочность при сжатии, МПа	
5	0,35	37	2905	6,8	5,4	940	24	2,1	880	3,1	44
10	0,31	38	3363	9,5	4,1	1260	25	4,7	1010	5,2	37
15	0,3	38	3410	11,2	4,3	1370	25	4,3	1130	4,7	33

Примечание. Состав газобетона: портландцемента марки 400—220 кг; золы—580 кг; СаСl<sub>2</sub>—5,8 кг; алюминиевой пудры—500 г/м<sup>3</sup>,  $V/T=0,31$ . Электропрогрев при температуре 90° С по режиму 5+17 ч (данные взяты из акта внедрения).

10—15 мин. Вспучивание газомассы в бегунах позволяет обеспечить необходимую ее удобоукладываемость при пониженной подвижности, характеризуемой по Суттарду диаметром расплыва в 6—8 см вместо 9—10 см, принятых на заводе. Повышается также дисперсность сырьевой смеси и содержание активных СаО+MgO вследствие разрушения остеклованных оболочек зерен золы при ее истирании катками бегунов (табл. 46).

Прочность газозолобетона увеличивается с 2—2,5 до 4,7—5,2 МПа, водопоглощение снижается с 44 до 30—35% по сравнению с обычным способом приготовления газомассы.

Панели формовали в формах с пустотообразователями диаметром 9—11 см в количестве 9 шт.

Для панелей с технологическими пустотами общее время тепловлажностной обработки составило 14—15 ч (4—5 ч — подъем температуры, 10 ч — изотермическая выдержка), вместо 22 ч, принятых на заводе.

При электропрогреве сплошных панелей влажность в поверхностном слое, среднем и наружном слоях была в пределах 26—28%, в панелях с пустотами влажность колебалась от 9 до 17%.

Усадочные деформации в панелях с технологическими пустотами уменьшились в 1,5—2 раза и достигли 0,5—1,1 мм/м вместо 1,9—2,5 мм/м, характерных для заводских панелей.

Наряду с контактным методом электропрогрева при выпуске опытной партии был опробован прогрев панелей генераторами инфракрасного излучения (теплоэлектронагревателями — ТЭНами), позволяющий совмещать процессы тепловлажностной обработки и сушки изделий.

В этом случае в пустоты отформованных панелей вводили ТЭНы. Изделия прогревались и твердели в закрытых формах. Сушка бетона осуществлялась сразу же по окончании экзотермического твердения при повышении температуры бетона до 105—110° С. Генераторы инфракрасного излучения имели мощность 4,06 кВт и силу тока 32 А. Режим прогрева был принят 5+ +14 ч. Влажность газобетона по сечению изделия составляла 3—5% в центральном слое и 7—10% у поддона.

Интенсивное удаление влаги при равномерном ее распределении по сечению панели в процессе термообработки, несмотря на повышенную температуру в бетоне, способствовало получению бездефектных изделий с низкой конечной влажностью.

Линейные деформации равномерно распределялись в теле бетона в процессе его твердения, не вызывая опасных градиентов напряжений. К концу термообработки при высыхании бетона усадки почти полностью были завершены. Это предопределяет повышенную трещиностойкость и долговечность панелей, прошедших совмещенные процессы твердения и сушки при их прогреве генераторами инфракрасного излучения.

С целью подтверждения положительных результатов исследований на заводе ЖБИ г. Ангарска была выпущена вторая опытная партия панелей по разработанной технологии на основе низкокальциевой золы.

Выпуск опытной партии панелей производился на основе золы Иркутской ТЭЦ.

Применяли следующий состав сырьевой смеси:

Портландцемент марки 300 с содержанием $C_3S=55-57\%$ . . . . .	270 кг/м <sup>3</sup>
Зола Иркутской ТЭЦ . . . . .	590 »
Известь молотая негашеная . . . . .	15 »
Хлористый кальций . . . . .	4 »
Алюминиевая пудра ПАК-3 . . . . .	0,4 »
СДБ (твердое) . . . . .	0,0154 »
Вода . . . . .	410 л/м <sup>3</sup>

Было изготовлено несколько панелей с введением безобжигового зольного гравия и керамзита в качестве структурообразующей добавки.

Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> газозолобетона был следующий:

Портландцемент марки 300 . . . . .	270 кг
Зола Иркутской ТЭЦ . . . . .	150 »
Известь молотая . . . . .	15 »
Структурообразующая добавка . . . . .	450 »
Алюминиевая пудра ПАК-3 . . . . .	0,180 »
Хлористый кальций . . . . .	2 »
Вода . . . . .	280 л

Газозолобетонную массу приготавливали в бегунах. Длительность перемешивания газозолобетонной массы с алюминиевой суспензией была принята 1—1,5 мин по заводской технологии и 10—15 мин при поризации массы в смесителе.

Формование панелей производилось в заводских формах и формах, оборудованных пустообразователями. (рис. 56).

Термообработка панелей осуществлялась контактным электропрогревом с накладным электродом по режимам, принятым на заводе, и прогревом генераторами инфракрасного излучения.

Отделку опытных панелей производили по заводской технологии поризованным раствором и цементно-перхлорвиниловыми красками. До монтажа дома панели хранили на открытом складе.

Экспериментальные работы в производственных условиях еще раз показали возможность замены существующего на заводе контактного метода электропрогрева термообработки панелей нагревателями инфра-

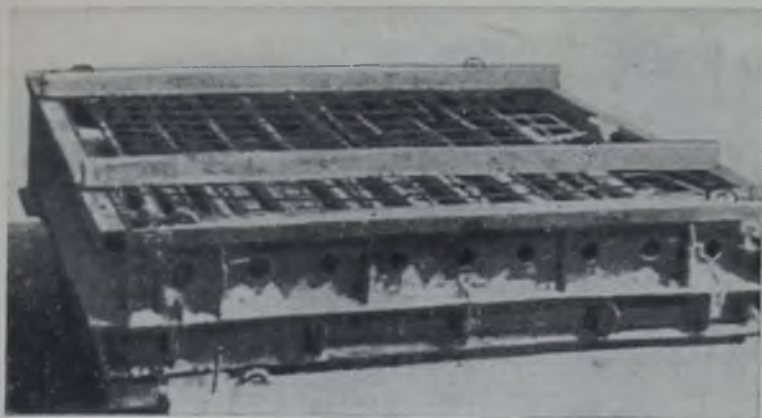


РИС. 56. МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ФОРМА С ОТВЕРСТИЯМИ ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ С ПУСТОТАМИ

красного излучения с целью получения изделий с пониженной влажностью.

Испытание образцов, отобранных из панелей, показало, что отпускную прочность в 5,5—6 МПа можно получить через 12—14 ч прогрева. Влажность панелей, обработанных ТЭНами, составила в среднем 10—15% вместо 35—38% для заводских панелей.

Полные усадочные деформации газозолобетона находились в пределах 1,4—1,6 мм/м вместо 2,2—2,6 для панелей, прогретых контактным методом.

Усадки, полученные при высушивании до постоянной массы газозолобетона, прогретого ТЭНами, составили 0,5—0,8 мм/м, что в 1,5—2 раза ниже усадок, характерных для бетона, прогретого контактным методом.

Следует отметить, что термообработка панелей ТЭНами дает возможность сократить расход электроэнергии по сравнению с контактным электропрогревом на 20% при одинаковых режимах и на 40% при сокращении длительности термообработки до 14 ч.

Кроме того, на заводе железобетонных изделий в Ангарске в полупроизводственных условиях был получен безобжиговый зольный гравий объемной массы 550—600 кг/м<sup>3</sup> с прочностью при сжатии в естественном состоянии 1—2 МПа и изготовлены стеновые панели из неавтоклавного газозолобетона с добавкой полученного зольного гравия (табл. 47).

222 Таблица 47. Свойства панелей из газозолотона без добавки безобжигового зольного гравия и с добавкой его в количестве 45% (по массе), изготовленных на Ангарском заводе железобетонных изделий

Технология изготовления панелей	Характеристика газозолотонной массы					Влажность панелей, % по массе			Объемная масса газобетона панелей, кг/м <sup>3</sup>			Водопоглощение, % по массе	Предел прочности при сжатии газобетона, МПа		Коэффициент размягчения	Усадка газобетона, мм/м	
	подвижность по Суттарду, см	водотвердое отношение	температура массы, °С	объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		на глубине, см			после электропрогрева	в сухом состоянии	в водонасыщенном состоянии		после электропрогрева	в сухом состоянии		при высушивании до 6-8%	при высушивании до постоянной массы
				при заливке в форму	после вспучивания	3-5	20	37									
Технология заводская, газобетон без добавки, фактура из цветного поризованного бетона	7	0,47	38	1520	1390	38,5	36,8	33,7	1240	950	1400	46	7	7,5	0,85	2,2	2,9
Технология заводская, газомасса с добавкой керамзита, фактура из цветного поризованного бетона	6,5	0,37	36	1470	1360	25,6	27,4	24	1140	950	1220	27	6,9	7,2	0,75	0,8	1

То же, газомасса с добавкой безобжигового зольного гравия на портландцементе; фактура из цветного поризованного бетона	6,8	0,4	36	1620	1320	33,1	32,4	29,4	1170	920	1270	28	5,8	6,6	0,78	1,1	1,3	
Панели с технологическими пустотами, газомасса с добавкой зольного гравия на портландцементе, фактура из цветного поризованного бетона	6,8	0,38	34	1510	1240	27,8	27,3	26,9	1230	960	1320	36	6,7	8,2	0,75	0,9	1,1	
Технология заводская, газомасса с добавкой зольного гравия на ГЦП вяжущем:																		
а) без фактуры	6,8	0,39	34	1650	1300	—	—	—	1170	930	1330	39,6	3,5	4,9	2,75	0,8	1	
б) с фактурой из цветного поризованного бетона	6,5	0,39	30	1540	1260	31,4	31,8	27,2	1240	940	1350	37,5	4,2	4,6	0,78	0,9	1,2	

Примечания: 1. Панели с добавкой зольного гравия на ГЦП вяжущем изготавливались на пуццолановом п/цементе М300.

2. Режим электропрогрева 6+13 ч, температура 90—95° С.



Гравий изготовляли из местного сырья — золы Иркутской ТЭЦ, портландцемента марки 300 Ангарского завода и строительного гипса.

Введение в газозолобетон безобжигового зольного гравия в количестве до 45% по массе снижает водотвердое отношение с 0,5 до 0,37; повышает прочностные характеристики на 20—25% без изменения объемной массы и уменьшает водопоглощение на 15—20% по сравнению с обычным газозолобетоном.

Усадочные деформации газозолобетона с зольным гравием зависят также и от собственной усадки зольного гравия, т. е. от его конечной влажности.

Газозолобетон в панелях с добавкой зольного гравия был подвергнут физико-химическим исследованиям с целью выяснения влияния зольного гравия на процессы твердения безавтоклавного бетона и его долговечность. При этом установлено, что зольный гравий из золы (85%) и портландцемента (15%) хорошо сцепляется с цементным камнем и не влияет отрицательно на свойства последнего. Это обусловлено одним и тем же составом как исходного сырья (золы и цемента), так и продуктов твердения, представленных в основном гидросиликатами кальция переменного состава.

Бетон такого типа при твердении содержит свободную гидроокись кальция в пределах 1,6—2,8%, что обеспечивает создание стойкой щелочной среды и препятствует коррозии арматуры и закладных частей. В условиях эксплуатации наблюдается карбонизация поверхностного слоя, которая протекает за счет свободной гидроокиси кальция, количество которой снижается до 0,32—0,51%. В панелях с добавкой зольного гравия, изготовленного из золы и гипсоцементнопуццоланового вяжущего, через 3 мес после их изготовления новые контактные образования не обнаружены. Однако следует считать возможным появления вторичных минералов на границе зерен гравия, замещающего ячеистый бетон, в случае изготовления газобетона на портландцементе. Цементный камень на пуццолановом портландцементе не содержит свободной гидроокиси кальция. В связи с этим вынос сульфата кальция из гравия не может сопровождаться кристаллизацией гидросульфоалюминатов кальция из твердой фазы. Исследования показали, что зольный гравий из золы и портландцемента может применяться для изготовления бетонов на различных цемен-

Ир  
ого  
го  
о  
·  
·

тах, без каких-либо ограничений. Зольный гравий из золы и ГЦП вяжущих следует применять в бетонах и строительных конструкциях на пуццолановых цементах. Возможность применения такого вида гравия в бетонах на различных цементах нуждается в дополнительном обосновании данными длительных испытаний. Таким образом, экспериментальными работами в производственных условиях установлена эффективность применения зольного гравия в качестве структурообразующей добавки при производстве стеновых панелей из безавтоматического газозолобетона.

Наряду с улучшением строительно-деформативных свойств панелей введение в состав газобетона зольного гравия значительно ускоряет твердение массы, что дает возможность сократить до 30—60 мин (вместо 3—4 ч принятых на заводе) длительность предварительной выдержки панелей до затирки верхнего слоя и подключения электропрогрева, т. е. увеличить производительность завода на 20—40%.

Опытные ячеистобетонные панели через 7 мес после изготовления были доставлены в ЦНИИСК им. Кучеренко для испытания их на несущую способность [61].

### Несущая способность газозолобетонных стеновых панелей

Перед испытанием из панелей были высверлены цилиндры диаметром и высотой 5 см с целью определения объемной массы и прочности газозолобетона.

Сравнительные данные по прочности газозолобетона из панелей сразу после изготовления и спустя 7 мес показали, что прочность за 7 мес возросла на 35—70%, т. е. с 5—5,6 до 9—12 МПа. Кроме того, перед испытанием по сечению панелей были отобраны пробы на влажность. Повышенная влажность по сечению панелей по сравнению с заводской влажностью объясняется тем, что изделия в течение четырех осенне-зимних месяцев хранили на открытом складе ЦНИИСКа без прикрытия.

На всех панелях перед испытанием их на несущую способность было проведено определение степени однородности газозолобетона с помощью ультразвукового импульсного метода.

Каждая панель была разбита на квадраты со сторонами 20—25 см и пронумерована по всем точкам с помощью

прибора УКБ-1. Частота излучения датчиков 60 кГц. База прозвучивания — 40 см.

Для всех панелей характерна пониженная скорость ультразвука в нижней подоконной части панели.

Небольшая скорость прохождения ультразвука отмечалась в перемычке панелей до 2600 м/с. Несколько ниже она была в простеночных столбах (от 1700 до 2400 м/с).

В точках, где отсутствовал сигнал на приборе, предполагалось отслоение фактуры от газозолобетона. Простукивание этих участков панели подтвердило данное предположение.

В процессе испытания в указанных местах наблюдалось разрушение фактурного слоя. Анализируя полученные данные по скорости прохождения ультразвуковых волн через газозолобетон панелей, можно сделать следующие выводы: все панели отличаются значительной неоднородностью по прочности, при этом наибольшая прочность обнаружена в надоконной перемычке всех панелей, несколько ниже

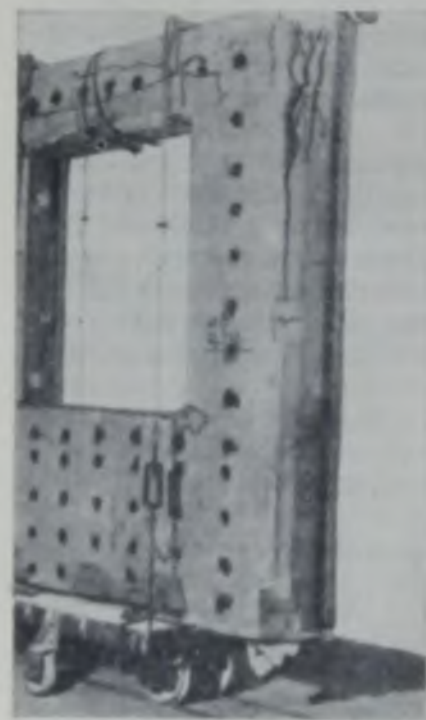


РИС. 57. ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ГАЗОЗОЛОБЕТОННЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ПОСЛЕ ПРОГРЕВА ТЭНами С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПУСТОТАМИ

прочность простеночных столбов. Наименьшей прочностью характеризуется подоконная ниша, а также нижняя часть простеночных столбов.

Фактура из поризованного бетона имеет неудовлетворительное сцепление с газобетоном панели, особенно в области подоконной ниши. Это объясняется большим разрывом во времени (более 2—3 ч) между укладкой поризованного бетона и газозолобетонной массы. При определении несущей способности панелей испытания

проводили по обычной методике, принятой в «Указаниях по контролю прочности и методам испытания панелей стен зданий».

Панели испытывали на прессе мощностью 1000 т.

Перед испытанием из стеновых панелей извлекали оконные коробки. Нагрузку на опытный образец подавали ступенями, равными  $\sim 0,1$  от ожидаемой разрушающей нагрузки.

Исследования показали, что контрольная разрушающая нагрузка всех панелей превышает разрушающую нагрузку в 11—18 раз.

Разрушение панелей с пустотами, изготовленных с термообработкой методом контактного электропрогрева, произошло при напряжении в газозолобетоне 5—5,5 МПа.

Панели, прогретые ТЭНами, разрушались при напряжениях 3,5—4 МПа. Таким образом, можно сделать вывод, что наличие технологических пустот в теле панели не отражается на несущей ее способности (рис. 57).

Некоторые снижения разрушающей нагрузки при испытании панелей с пустотами, обработанных ТЭНами, объясняются тем, что при прогреве этих панелей из-за отсутствия надлежащего контроля температура в теле бетона в отдельных случаях достигала 115—120° С. Вследствие высоких температур околопустотные зоны были сильно пересушены. Этим объясняется и хрупкое разрушение панелей по сечению технологических пустот при более низких разрушающих нагрузках.

### **Трещиностойкость и долговечность стеновых панелей из неавтоклавного газозолобетона**

Из опытных панелей, изготовленных на заводе ЖБИ в 1966 г. в Ангарске был построен экспериментальный дом, за которым в течение четырех лет было установлено наблюдение.

С целью оценки долговечности из газозолобетонных опытных панелей в условиях эксплуатации производился отбор проб через 2, 7, 12 мес и 2—3 года после их изготовления.

Определялась объемная масса в естественном состоянии, прочность при сжатии цилиндров диаметром 60 и 80 мм, влажность на глубинах 3—5; 20 и 37 см по сечению изделий, а также плотность трещин на внутренней поверхности (рис. 58).

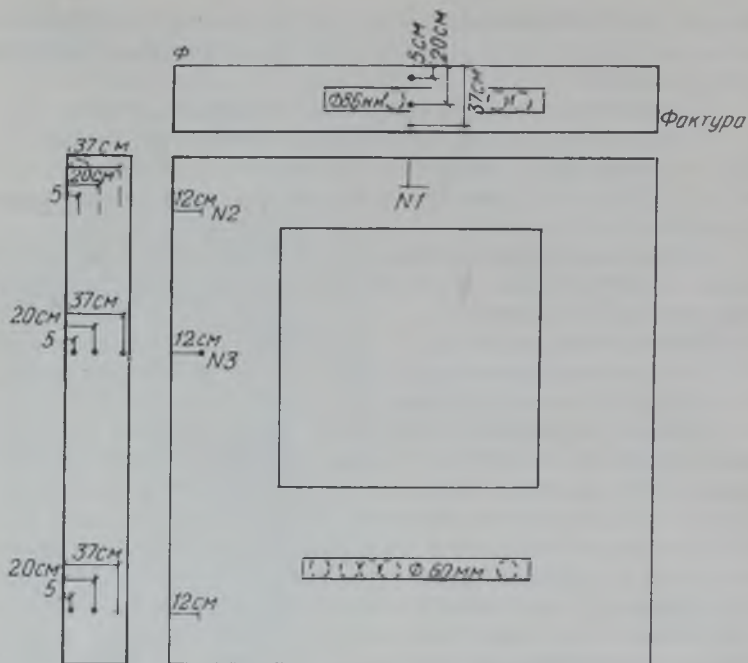


РИС. 58. СХЕМА ОТБОРА ПРОБ НА ВЛАЖНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ИЗ ОПЫТНЫХ ГАЗОЗОЛОБЕТОННЫХ ПАНЕЛЕЙ

Плотность трещин на наружной стороне панелей, офактуренных цветным поризованным бетоном, практически было невозможно определить, так как фактура искажает процесс трещинообразования.

Обследование состояния панелей, проведенное через два месяца после их изготовления, показало, что прочность при сжатии газозолотона, изготовленного с применением контактного электропрогрева, увеличилась в среднем на 15—20%, а при прогреве ТЭНами прочность увеличилась на 10—12%, что соответствовало прочности 8,5—9,5 МПа.

Открытое хранение панелей на складе привело к увеличению влажности газозолотона до 35—37%. На поверхности панелей, изготовленных по заводской технологии, появились волосные, усадочные трещины. Плотность трещин была равна 0,37—2,4 м/м<sup>2</sup>. Ширина раскрытия трещин 0,1—0,2 мм. Из 11 обследованных панелей, прогретых ТЭНами, трещины обнаружены толь-

ко на 6. Максимальная плотность трещин составила  $0,7—0,9$  м/м<sup>2</sup>, причем трещины были, в основном, сосредоточены в углах оконных проемов из-за конструктивных особенностей панелей.

С течением времени (через 2—3 года) прочность газозолобетонных панелей выровнялась и достигла 10—12 МПа.

За 6 мес эксплуатации влажность поверхностного слоя заводских панелей снизилась до 12—15%, а влажность на глубине 10 см, как и центрального слоя, практически не изменилась.

Перепад влажности по толщине панелей составил 15—20%, а к двум годам эксплуатации этот перепад составил 25—28%.

Введение в состав газозолобетона структурообразующей добавки — зольного гравия — способствовало снижению влажности в период изготовления панелей с 35 до 26—28%. При эксплуатации влажность поверхностного слоя снизилась до 5—6%, а перепад влажности по толщине составил 20—22%.

Перепад влажности поверхностного слоя панелей после облучения ТЭНами был равен 6—8%. Через два года перепад влажности составил 15—12%, что в два раза меньше, чем для заводских панелей.

Развитие трещин на поверхности панелей наблюдается в начальный период эксплуатации через 3—6—9 мес. В этот период была обнаружена максимальная усадка газозолобетона до 1,2—1,5 мм/м. Скорость развития трещин резко возросла к 6 мес и плотность их достигла 4 м/м<sup>2</sup> при усадке газозолобетона до 1,6—1,8 мм/м.

В возрасте 1—2 лет плотность трещин увеличилась до 6 м/м<sup>2</sup>, ширина раскрытия трещин колебалась от 0,01 до 0,15 мм, а глубина их — от 5 до 60 мм. К 3—4 годам скорость развития трещин замедлялась и носила затухающий характер.

В панелях, изготовленных по новой технологии, к 2—3 годам плотность трещин, в основном в углах оконных проемов, увеличилась с 0,38 до 2,1 м/м<sup>2</sup>, при этом максимальный перепад влажности не превышал 10—12%, а усадка не превышала 1—1,2 мм/м.

С уменьшением влажности с 30—35 до 5—8% (до равновесной) усадка для образцов, выпиленных из панелей заводской технологии, составляет 1,25—1,3 мм/м,

для панелей, прогретых ТЭНами, —0,7—0,5 мм/м, т. е. в 2—2,5 раза меньше, что предопределяет повышенную трещиностойкость изделий.

Из изложенного следует, что изготовление массовых изделий с пустотами при контактном электропрогреве или введении в состав газозолобетона структурообразующих добавок (зольного гравия, керамзита) уменьшает количество усадочных трещин, однако плотность их достаточно велика. Наиболее эффективным мероприятием, способствующим повышению трещиностойкости крупноразмерных газозолобетонных изделий, является применение для их прогрева теплоэлектронагревателей инфракрасного излучения (ТЭНон) в комплексе с другими предложенными мероприятиями.

Положительные результаты комплекса проведенных испытаний и натурных наблюдений позволяют сделать вывод, что технология, разработанная кафедрой технологии вяжущих веществ и бетонов МИСИ им. В. В. Куйбышева, значительно повышает качество и трещиностойкость панелей из неавтоклавного газозолобетона.

Однако надлежащего качества панелей еще недостаточно для хорошей их службы в здании.

На долговечность ограждающих конструкций из ячеистого бетона большое влияние оказывает преждевременное их «размораживание» в процессе ведения строительно-монтажных работ, а также во время эксплуатации зданий.

С целью выявления причин подобных повреждений в Воронежском инженерно-строительном институте были проведены исследования механизма разрушения газосиликата в водонасыщенном состоянии (на фрагментах стеновых панелей при одностороннем воздействии отрицательной температуры). Установлено, что при таком замораживании, моделирующем натурные условия, создаются исключительно тяжелые условия службы материала за счет направленной миграции влаги к зоне льдообразования и возникновения в ней прослоек и друз кристаллов льда, вызывающих слонстое разрушение ячеистого бетона. Таким образом, обеспечение трещиностойкости и долговечности конструкций из ячеистого бетона возможно лишь при условии выполнения всего комплекса технологических требований, повышения качества строительно-монтажных работ и соблюдения температурного режима эксплуатации здания.

## Исследование изменений фазового состава и микроструктуры газозолобетона при эксплуатации стеновых панелей

Изменение фазового состава и микроструктуры затвердевшего газозолобетона при длительном хранении изучалось на образцах, выпиленных из центра стеновых панелей, приготовленных по различным технологическим режимам и хранившихся в течение 7 мес на открытой площадке и 14 мес в стене здания.

В исходном ячеистом бетоне присутствует кристаллическая фаза исходных компонентов в виде кварца, полевого шпата, муллита (в золе), силиката кальция  $\beta 2\text{CaOSiO}_2$  и  $3\text{CaOSiO}_2$  и алюмоферриты кальция, сохранившиеся в крупных частицах клинкера.

Во всех образцах в малом количестве наблюдается окись кальция. Продукты гидратации неавтоклавного газозолобетона выражены не ясно. Среди них обнаружены свободная гидроокись кальция и гидросиликаты кальция —  $\text{CSH(B)}$  тоберморит и  $\text{C}_2\text{SH(A)}$ , присутствует также гидрат окиси кальция и гидрогранаты с пониженным содержанием кремнезема. Петрографические изучения образцов показали, что в межзерновом пространстве превалирует гелевидная фаза со средним светопреломлением  $N$  от 1,53 до 1,535, интенсифицируемая как  $\text{C}_2\text{SH}_2$ , на периферии частиц золы присутствует другая гелевидная фаза с заметно меньшим светопреломлением (в пределах 1,5—1,51), относящаяся к гидросиликатам кальция группы  $\text{CSH(B)}$ .

Гелевидные фазы включают кристаллические включения, характер которых изменяется в зависимости от условий термообработки панелей и последующего их хранения.

Ниже специально было рассмотрено влияние условий тепловой обработки и хранения панелей из ячеистого бетона на его фазовый состав и микроструктуру.

Исследовали образцы, отобранные из панелей после 3- и 7-месячного хранения на открытом складе, а также после 14-месячного нахождения в стене дома, выстроенного в Ангарске.

**Панели типа 1-б.** Указанные панели изготовлены по заводской схеме (т. е. без пустот, при обычном перемешивании и контактном электропрогреве).

Бетон трехмесячного возраста характеризуется до-



вольно высокой степени гидратации портландцементного клинкера и присутствием цементирующего вещества, представленного гидросиликатами кальция — как гелевидным  $C_2SH_2$  и группы  $CSH(B)$ , так и кристаллическим тоберморитом.

Увеличение продолжительности эксплуатации панелей до 7—14 мес приводит к уменьшению содержания клинкерных минералов — силикатов вследствие их гидратации и к относительно небольшому росту гидросиликата кальция  $CSH(B)$  и кальцита.

Эти данные позволяют установить, что при длительной эксплуатации панелей за счет гидратации алита, белита и взаимодействия гидроокиси кальция, а также фазы  $C_2SH_2$  с зольными частицами образуются гидросиликаты кальция группы  $CSH(B)$  с составом  $C_4S_3H_n$ .

При микроскопическом изучении образцов зафиксировано снижение среднего светопреломления цементирующего вещества за счет выделения гелевидной фазы  $C_4S_3H_n$ .

**Панели типа 2-б.** Эти панели также изготовлены по заводской схеме, без пустот и при контактном электропрогреве, но с длительным перемешиванием.

Исходный бетон трехмесячного возраста содержит гидросиликат кальция  $CSH(B)$  и тоберморита, причем последний минерал несколько больше выражен, чем в панели 1-б, изготовленной при обычном перемешивании. Таким образом, длительное перемешивание ячеистой массы (смеси) способствует лучшей кристаллизации новообразований, но полнота гидратации клинкерных минералов не увеличивается.

При эксплуатации панелей типа 2-б также наблюдается продолжение гидратации минералов портландцементного клинкера. Одновременно повышается содержание гидросиликатов кальция группы  $CSH(B)$  и кальцита.

Образец 14-месячного возраста отличается от исходного образца значительным увеличением интенсивности кристаллизации продуктов твердения, что обусловлено повышением содержания гелевидных гидросиликатов группы  $CSH(B)$  с составом  $C_4S_3H_n$ .

Наблюдается несколько большая закарбонизованность ячеистого бетона из панели типа 2-б по сравнению с бетоном панели типа 1-б.

Полученные данные свидетельствуют о положитель-

ном влиянии длительного перемешивания не только на процесс твердения при водотепловой обработке бетона за счет улучшения кристаллизации новообразований, но и на процессы взаимодействия со стеклофазой золы при последующем хранении или эксплуатации. Все это способствует существенному улучшению физико-механических свойств панелей.

**Панель типа 3-б.** Такие панели, изготовленные по заводской схеме (обычное перемешивание, контактный прогрев), имели пустоты, способствующие более быстрому и равномерному прогреву бетона.

Исходная панель 3-месячного возраста характеризовалась высокой степенью гидратации клинкерных минералов, но имела несколько необычный состав продуктов твердения. В бетоне преобладали высокоосновные гидросиликаты кальция  $C_2SH_2$ ,  $C_2SH(A)$  и  $C_2SH(B)$ , сохранялась также свободная гидроокись кальция.

Присутствие перечисленных соединений приводит к уплотнению межзернивого пространства и к уменьшению удельной поверхности  $Ca(OH)_2$ . Эти данные привели нас к выводу, что наличие технологических пустот способствует сохранению несвязанной извести, повышению основности гидратных новообразований и улучшению их окристаллизованности. Все это является следствием более быстрого обезвоживания при электропрогреве бетона панели с пустотами по сравнению с бетоном из сплошной панели.

Сопоставленные результаты изучения бетона в панели с пустотами и в аналогичной сплошной панели (типа 1-б) показывают, что наличие технологических пустот повышает степень гидратации клинкерных минералов и улучшает процесс твердения ячеистого золобетона (но только при сохранении достаточного количества воды в теле бетона).

Если же происходит пересушивание бетона, то последний содержит несвязанную  $Ca(OH)_2$  и высокоосновные гидросиликаты кальция, которые хотя и снижают усадочные деформации панелей, но одновременно уменьшают их прочность и способность к последующему твердению при хранении и эксплуатации в зданиях.

**Панели типа 4-б.** Эти панели готовили с пустотами при контактном электропрогреве и длительном перемешивании яченистой массы.

Исходный трехмесячный бетон отличался повышенной

окристаллизованностью цементирующего вещества за счет перехода значительной части фазы  $\text{CSH}(\text{B})$  в тоберморит. Дальнейшее твердение бетона при службе панели в стене здания приводит к еще большему снижению количества негидратированных силикатов кальция.

При изучении шлифов под микроскопом фиксируется снижение среднего светопреломления цементирующего вещества до 1,51—1,52 благодаря росту содержания в нем гидросиликатов кальция группы  $\text{CSH}(\text{B})$  с составом  $\text{C}_4\text{S}_3\text{H}_n$  и уменьшению количества фазы  $\text{C}_2\text{SH}_2$ .

Таким образом, длительное перемешивание ячеистой смеси улучшает процесс кристаллизации гидросиликатов кальция при твердении бетона, не повышает полноты гидратации минералов клинкера в процессе водотепловой обработки, но ускоряет гидратацию их при дальнейшем хранении панелей.

**Панели типа 5-б.** Панели указанного типа имели пустоты и были изготовлены в условиях электропрогрева ТЭНами (перемешивание ячеистой смеси обычное).

Исходный бетон 3-месячного возраста включал относительно много негидратированных клинкерных минералов и свободную гидроокись Са.

Продукты твердения представлены гидросиликатами кальция  $\text{C}_2\text{SH}_2$ ,  $\text{CSH}(\text{B})$ ,  $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$  и тоберморитом (последнего мало).

Последующее нахождение панели в стене дома привело к связыванию  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и продолжению гидратации клинкерных минералов.

Микроскопическое изучение образца подтверждает переход значительной части гидросиликата  $\text{C}_2\text{SH}_2$  в низкоосновные гидросиликаты, приводящий к значительному снижению светопреломления их.

Полученные данные показывают, что длительное выдерживание панелей, изготовленных электропрогревом ТЭНами, на воздухе или в стене дома также сопровождается гидратацией минералов клинкера и твердением бетона. При этом не меняется содержание гидросиликатов кальция  $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$  и тоберморита, стабильных в нормальных условиях, уменьшается количество гидросиликатов группы  $\text{CSH}(\text{B})$  со средним составом  $\text{C}_4\text{S}_3\text{H}_n$ . Последнее свидетельствует об интенсивном участии в процессе твердения стеклофазы частиц золы.

Следует отметить, что в панелях типа 5-б, изготовленных с помощью ТЭНов, сохраняется значительно больше

негидратированных клинкерных минералов, чем в аналогичных панелях типа 3-б (полученных методов контактного электропрогрева). Это обуславливает меньшую прочность свежееизготовленного бетона, но способствует более интенсивному последующему (в срок 2—3 года) твердению бетона непосредственно в зданиях и сооружениях.

**Панели типа 6-б.** Эти многопустотные панели изготовлены с применением рекомендованной технологии, т. е. длительного перемешивания ячеистой смеси и электропрогрева ТЭНами.

Исходный 3-месячный бетон характеризуется лучшей окристаллизованностью цементирующего вещества, чем бетон в панелях типа 5-б, полученный при обычном перемешивании. В нем отсутствуют свободная гидроокись кальция и гидросиликат кальция  $C_2SH(A)$ , а содержание фазы  $CSH(B)$  более высокое.

Увеличение продолжительности хранения панели на воздухе до 7 мес приводит к повышению содержания в них гидросиликатов кальция  $C_2SH_2$ .

Одновременно снижается содержание клинкерных минералов. 14-месячное пребывание панели в здании обуславливает еще более полную гидратацию частиц цемента и образование за счет фазы  $C_2SH_2$  и гидроокисей кальция, реагирующих со стеклофазой золы, низкоосновных гидросиликатов кальция группы  $CSH(B)$ .

Таким образом, длительное перемешивание ячеистой смеси улучшает окристаллизованность цементирующего вещества ячеистого золобетона при электропрогреве ТЭНами в той же степени, что и при контактном электропрогреве. Степень гидратации минералов клинкера также не повышается.

Последующее твердение бетона при эксплуатации панелей, изготовленных по рекомендованной технологии, проходит более интенсивно в случае применения длительного перемешивания ячеистой смеси и приводит к ускоренному росту прочности бетона.

Переход от контактного электропрогрева к прогреву панелей ТЭНами приводит к некоторому замедлению процесса гидратации клинкерных минералов и увеличению основности и окристаллизованности гидросиликатов кальция за счет преимущественного образования  $C_2SH_2$  и  $C_2SH(A)$ . Результатом этого является замедленный рост прочности бетона при сжатии, компенсирующийся

существенным снижением усадочных деформаций бетона и улучшением его трещиностойкости.

Последующее твердение бетона в панелях при их хранении или эксплуатации развивается несколько менее интенсивно, чем при контактном электропрогреве, в случае обычной заводской схемы подготовки ячеистой смеси (т. е. при обычном перемешивании ее). Если же применяется длительное перемешивание, то процесс последующего твердения бетона в панелях, полученных с помощью ТЭНов, идет более интенсивно, чем в аналогичных панелях, твердевших при контактном электропрогреве (панели типа 4-б).

Неавтоклавный газозолобетон, полученный по новой технологии, обладает пониженными усадочными деформациями, повышенной трещиностойкостью и обеспечивает заданную долговечность стеновых панелей при эксплуатации даже в таких жестких климатических условиях, какие свойственны Восточной Сибири.

Таким образом, анализ практики производства и применения шлакозолобетонных изделий показывает, что на трещиностойкость и долговечность конструкций влияет не только вид тепловой обработки, но и качество исходного сырья, состав бетона, способы формирования ячеистой структуры. Отсюда следует вывод: при оптимизации всех технологических переделов — подготовки сырья, формирования ячеистой структуры, ускорения твердения изделий — возможно на основе шлаков и зол получать долговечные конструкции из ячеистых бетонов при твердении как в автоклаве, так и в пропарочной камере и при обработке электрическим током.

На Люберецком комбинате строительных материалов и конструкций параллельно с выпуском опытной партии теплоизоляционных изделий из электропрогретого газозолобетона объемной массой 470—510 кг/м<sup>3</sup> были изготовлены стеновые панели из конструктивного газозолобетона автоклавного твердения объемной массой 700 кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии 4,5—5,5 МПа.

Для теплоизоляционного и конструктивного газобетона использовали отвальную шлакозольную смесь московской ТЭЦ-22 с влажностью 12—15%, из которой приготавливали бесклинкерное вяжущее состава 65:35:5 (шлакозольная смесь: известь: гипс) и шлакозольный шлам. Сырье для производства вяжущего перемешивали перед приемным бункером на площадке в соотношении

1:2 (известь: смесь шлака 60% с 40% золы) и загружали в бункер, где происходило частичное гашение извести благодаря наличию влаги в шлакозольной смеси.

Из приемного бункера известково-шлаковую смесь подавали элеватором в дозировочный бункер, из которого при помощи тарельчатого питателя подавали в течку мельницы. Двухводный гипс поступал в мельницу с помощью тарельчатого питателя в количестве 5% от массы известково-шлаковой смеси. При помоле из течки мельницы отбирали пробы вяжущего для определения активных  $\text{CaO} + \text{MgO}$ .

Анализ отобранных проб показал, что во время помола активность вяжущего изменялась от 40 до 30%. Тонкость помола была в пределах 4000—4500  $\text{см}^2/\text{г}$ . Нормальная густота вяжущего составляла от 45 до 55%, начало схватывания через 2—8 мин, конец через 10—15 мин, прочность при сжатии после запаривания 22 МПа.

Производственный опыт подтвердил предположение о возможности изготовления известково-шлакозольного вяжущего совместным помолом без предварительного подсушивания сырья, имеющего влажность в отвале до 15%. Это значительно упрощает помол и снижает стоимость вяжущего.

Шлакозольный шлак приготавливали в мельнице мокрого помола по технологической схеме для газосиликатных стеновых панелей, выпускаемых на этом заводе.

Сырье из приемного бункера подавали элеватором в расходный бункер, перед которым установлено вибросито, предназначенное для выделения из песка крупных камней и кусков глины.

Смесь в мельницу подавали с помощью тарельчатого питателя. При питании мельницы шлакозольной смесью со скоростью подачи песка, зерна шлака диаметром 10—15 мм не успевали размалываться. С уменьшением скорости подачи сырья работа мельницы нормализовалась. Шлакозольный шлак при помощи пневмонасоса подавали в шламбассейн. Полученный шлак характеризовался объемной массой в 1,58  $\text{т}/\text{м}^3$ , поглощением  $\text{CaO}$  из насыщенного раствора в условиях тепловлажностной обработки более 100  $\text{мг}/\text{г}$  и тонкостью помола в 3050  $\text{см}^2/\text{г}$ . Температура шлама составляла 20—22° С. За период нахождения шлама в шламбассейне (около двух недель) при постоянном перемешивании загустевание и оседание его не наблюдалось.

Таблица 48. Результаты испытаний газшлакозобетона при выпуске опытных партий стеновых панелей

Составы конструктивного газшлакозобетона, кг/м <sup>3</sup>	В/Т	Содержание активных СаО+МgО, %	Содержание активных СаО+МgО после автоклавной обработки, %	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup> , в сухом состоянии	Прочность при сжатии в сухом состоянии, МПа
Цемент — 160 Известь — 120 Шлам — 370	0,4	13	3,27	689	5,4
Цемент — 100 Известь — 120 Шлам — 430	0,41	12,3	3,50	700	4,9
Цемент — 75 Известь — 120 Шлам — 455	0,41	13,1	3,29	705	4,8
Бесклинкерное шлакозольное вяжущее+шлам	0,41	12	2,91	680	4,3

Примечание. Режим запаривания при 175°С 2+6+3,5 ч.

Основной целью при выпуске опытной партии изделий из газшлакозобетона являлась замена смешанного известкового цементного вяжущего шлакозольным, позволяющим снизить расход портландцемента со 160 до 100 и 75 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона. Газомассу приготавливали в самоходной виброгазомешалке, куда подавали шлакозольные вяжущее и шлакозольный шлам.

Было опробовано четыре состава. Результаты производственных испытаний представлены в табл. 48.

Анализ полученных данных свидетельствует о возможности замены песчаного шлама шлакозольным и снижения расхода портландцемента до 75 кг/м<sup>3</sup>, т. е. в два раза. В случае использования бесклинкерного шлакозольного вяжущего отмечено некоторое снижение проч-

Таблица 49. Оптимальные режимы тепловой обработки крупноразмерных шлакозольных изделий из ячеистого бетона

Способ тепловой обработки	Подъем температуры, ч	Изотермическая выдержка, ч	Способ сушки	Температура сушки, °С	Продолжительность сушки, ч	Снижение температуры, ч	Влажность бетона по окончании термообработки, % по массе	Расход электроэнергии кВт·ч/м <sup>3</sup> или пара, кг/м <sup>3</sup>	Примечания
Автоклавная обработка при температуре 175° С и выше	2—3	8	—	—	—	2—3	24—26	400—500 кг/м <sup>3</sup> пара высокого давления	—
Пропаривание при 90—95° С	2	10	Горячим газом или горячим воздухом	120—140	3	2	15	250—350 кг/м <sup>3</sup> пара	Горячие теплоносители в процессе сушки подаются в пустоты изделий
Контактный электропрогрев при 95—100° С под пленкой	2—3	10—12	Электрическим током	95—70	2,5—3,5	2	15	50—90 кВт·ч/м <sup>3</sup>	Пленка при сушке снимается
			ТЭНами	110—120	3—4	2—3	10—15	70—100 кВт·ч/м <sup>3</sup>	То же
Прогрев ТЭНами при 100° С под пленкой	3	8—10	То же	110—120	3—4	2—3	10—15	60—90 кВт·ч/м <sup>3</sup>	»



ности (на 7—10%). Однако эти результаты были получены при 6-часовой изотермической выдержке изделий в автоклаве.

Таким образом, полученные результаты при выпуске опытной партии и многочисленные лабораторные исследования еще раз доказали, что при применении шлакозольной смеси в производстве вяжущих и заполнителей можно получать при автоклавном твердении качественный конструктивный газшлакозобетон из бесклнкерных вяжущих или с пониженным расходом портландцемента до 50—75 кг/м<sup>3</sup> бетона. Твердение теплоизоляционного газшлакобетона объемной массой 450—510 кг/м<sup>3</sup> осуществлялось методом контактного прогрева под паронепроницаемой пленкой по режиму 2+10 ч и 3 ч сушка.

Влажность бетона после электропрогрева была в пределах 20—23%, а прочность при сжатии от 0,9 до 1,6 МПа в зависимости от содержания в 1 м<sup>3</sup> бетона портландцемента.

На основании положительных результатов опробования изготовления шлакозольных ячеистобетонных изделий в заводских условиях в табл. 49 представлены эффективные условия их твердения с отработанными оптимальными режимами, включающими изотермический прогрев и сушку изделий.

## 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ШЛАКОВ И ЗОЛ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ СТРАНЫ

Отечественные исследования и многолетний опыт практики подтверждают большие технические и экономические преимущества применения шлаковых и зольных материалов в производстве ячеистобетонных изделий и конструкций.

В настоящее время в ряде районов страны, преимущественно на Украине и в Сибири, имеются более 20 действующих заводов, выпускающих теплоизоляционные и теплоизоляционно-конструктивные изделия из шлакозольных ячеистых бетонов объемной массой 450—550; 600—800; 900—1100 кг/м<sup>3</sup>. Среди них лишь 5—7 предприятий (Донецкий, Днепропетровский, Нижне-Тагильский, Ново-Кузнецкий и др.) выпускают ячеистобетон-

ные изделия с использованием доменных гранулированных шлаков. Остальные заводы (Иркутский, Ангарский, Норильский, Ступинский, Нарвский, Прибалтийский и др.) используют для ячеистого бетона пылевидные золы, обладающие меньшей стабильностью свойств и пониженной гидравлической активностью [2, 46, 57].

Причем большинство заводов выпускает изделия из газозолобетона неавтоклавного твердения, с повышенной конечной влажностью и пониженной трещиностойкостью.

Так, в Ангарске, Иркутске, Красноярске уже более 10 лет стеновые панели для жилых и промышленных зданий изготовляют из газозолобетона объемной массой 900—950 кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии 6—7,5 МПа. Ускорение твердения на этих заводах осуществляется контактным электропрогревом по режиму (4—5) + (12—14) + (1—2) ч при температуре 95—98°С. Влажность свежепрогретых изделий находится в пределах 30—38%. Полные усадочные деформации достигают 2,5—2,9 мм/м. Средний расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона составляет: портландцемента—250—270 кг; извести—15—25 кг; гипса—10 кг; золы—550—600 кг; алюминиевой пудры ПАК-3 0,3—0,4 кг; хлористого кальция—4—6 кг; воды—400—470 л. Мощность заводов до 120—160 тыс. м<sup>3</sup>/год. Однослойные стеновые панели из неавтоклавного газозолобетона широко применяют при строительстве жилых и промышленных зданий в Ангарске, Иркутске, Красноярске, а также в областных и районных центрах Восточной Сибири.

Учитывая эффективность и экономичность производства газозолобетонных панелей с тепловой обработкой электропрогревом, наличие больших запасов пылевидных зол, необходимо продолжить изучение и совершенствование технологии изготовления однослойных панелей неавтоклавного твердения с целью получения их с повышенной трещиностойкостью.

Одним из наиболее реальных способов уменьшения трещинообразования является введение в газозолобетон структурообразующей добавки в виде плотного или пористого крупного заполнителя. Такая технология, разработанная в Печерниипроекте, позволила изготавливать крупноразмерные ограждающие конструкции из керамзитогазозолобетона на Воркутинском ДСК [9].

На комбинате изготавливали несущие панели наружных стен для серии дома I-335А. Кроме выпуска панелей для жилищного строительства комбинатом выпускаются панели наружных стен для промышленного строительства длиной до 6 м. Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> газокерамзитозолобетона объемной массы 950 кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии 6—7 МПа составил: портландцемента — 270 кг; керамзитового гравия марки М600 — 320 кг; золы ТЭЦ — 340 кг; алюминиевой пудры — 0,24 кг; воды — 300 л. Приготовление бетонной смеси осуществляется в бетономешалке принудительного перемешивания С-355.

Для затворения применяется подогретая вода до 60—80°С. Готовую бетонную смесь укладывают в форму, на дне которой уложен на песчаной подушке известняковый щебень с размером зерен 1,5—3,5 см.

После окончания вспучивания методом вибрации ликвидируется «горбушка» и производится затирка поверхности. Тепловая обработка осуществляется путем электропрогрева при температуре до 100°С. Введение в состав газозолобетона керамзита за счет соответствующего уменьшения количества золы позволило применить форсированные режимы электропрогрева 4+4+4 ч.

Электропрогрев идет в режиме при подаче энергии, несколько превышающей потребность на поддержание температуры изделия до 100°С. Это позволило сократить продолжительность тепловой обработки до 10—12 ч вместо 20—24 ч, необходимых для твердения газозолобетона. Введение керамзита способствовало снижению конечной влажности бетона до 15—16% и усадочных деформаций до 0,9—1,1 мин/м, т. е. в 2—2,5 раза меньше, чем для газозолобетона. Опыт эксплуатации стеновых панелей из газокерамзитозолобетона, обладающего пониженной влажностью и усадочными деформациями, свидетельствует о повышенной трещиностойкости изделий, что открывает возможность использования его не только в самонесущих, но и в несущих панелях наружных стен.

При изготовлении ячеистобетонных изделий из газозолобетона с твердением в пропарочных камерах на заводах в Свердловске, Тронцке, Ростове и др. также используется портландцемент в количестве 250—300 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона и изделия характеризуются наряду с удовлетворительной прочностью повышенной послепропа-

рочной влажностью (до 35—38%) и пониженной трещиностойкостью.

На предприятиях в Ступино, Нарве, Ахтме и др. газозолобетонные ограждающие конструкции изготавливаются запариванием в автоклавах. Высокотемпературные условия способствуют образованию повышенного количества цементирующего вещества, представленного, в основном, кристаллическими продуктами новообразований в виде группы  $C_2SH(A)$ ,  $CSH(B)$ , гидротранатами, обеспечивающими надлежащую прочность и пониженные усадочные деформации (до 0,5—1,1 мм/м). Кроме того, автоклавная обработка позволяет существенно снизить расход портландцемента или совсем отказаться от него в случае использования высококальциевых сланцевых зол [4, 46, 57] и получать газозолобетон повышенной прочности. Это обстоятельство предопределяет возможность снижения объемной массы для теплоизоляционно-конструктивных изделий до 700—600—500 кг/м<sup>3</sup> (вместо 900—800 кг/м<sup>3</sup> для неавтоклавных) и для теплоизоляционных 450—350 кг/м<sup>3</sup>, что существенно уменьшит массу зданий и сократит расход материалов.

Однако существующая практика производства на наших заводах пока еще не достигла совершенства. Так, Ступинский завод выпускает стеновые панели из газозолобетона объемной массой 710—680 кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии в сухом состоянии 4,3—4,5 МПа. Послезапарочная влажность составляет 25—27%, полные усадочные деформации находятся в пределах 0,9—1,2 мм/м, что приводит к образованию трещин в панелях через 3—6 мес их эксплуатации в зданиях. Нетрещиностойкость автоклавного газозолобетона, вероятно, объясняется повышенным расходом воды (до 384 л на 1 м<sup>3</sup> бетона), что приводит к формированию разрыхленных межпоровых перегородок и к повышенной остаточной влажности в затвердевшем бетоне, оказывающем решающее значение на величину влажностной усадки.

Таким образом, запаренный бесцементный газозолобетон, изготовленный по литевой технологии с  $V/T$  до 0,55—0,58, при стандартной прочности не обладает достаточной трещиностойкостью. С целью снижения усадочных деформаций в настоящее время на Ступинском заводе в газозолобетон вводится до 20—30% структурообразующей добавки в виде аглопоритового щебня.

Крупный пористый наполнитель несколько снижает  $B/T$ , что оказывает положительное влияние на конечную влажность изделий и усадочные деформации. Вероятно, целесообразно было бы на заводе использовать вибрационную технологию, которая дает положительный эффект при изготовлении газосиликатных крупноразмерных изделий на Люберецком, Гродненском, Калининском и других заводах [38, 64, 62].

Изучение положительного опыта производства и применения ячеистобетонных стеновых конструкций из доменных гранулированных шлаков в Донецке, Днепропетровске, Ново-Кузнецке и др. свидетельствует о широких возможностях использования неавтоклавного газшлакобетона в жилищном, промышленном и сельском строительстве.

В Донецке, Ворошиловграде более 10 лет изготавливались панели наружных стен и блоки из газшлакобетона объемной массой 1000—1100 кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии 7—8 МПа. Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> составляет: 130—150 кг портландцемента, 45 кг извести, до 15 кг гипса, 150 кг пылевидной золы, 450 кг молотого гранулированного шлака, ПАК-3 до 0,4 кг и 320 л воды. Пропаривание осуществляется по режиму 3+9+4 ч при температуре 90—95°С. Послепропарочная влажность бетона составляет 25—28%, усадка достигает 2,5—3 мм/м. При введении крупного наполнителя, рядового гранулированного шлака в количестве 300—350 кг/м<sup>3</sup>, усадочные деформации снижаются до 1,1—1,3 мм/м. В настоящее время построено большое количество жилых и промышленных зданий из газшлакобетонных панелей неавтоклавного твердения. Исследования этих панелей показали достаточную их трещиностойкость при эксплуатации в зданиях. Прочностные характеристики газшлакобетона, выпиленного из панелей, со временем возросли на 30—35%. Коэффициент размягчения составил 0,8—0,85, морозостойкость превысила 50 циклов. Полученные данные свидетельствуют о долговечности и надежности ячеистобетонных панелей из пропаренного шлакобетона.

Аналогичные стеновые панели выпускались на заводе в Днепропетровске, где построено из них более 20 жилых зданий. Газшлакобетон изготавливался из бесклинкерного шлакового вяжущего (состав 75:20:5—гранулированный доменный шлак:известь:гипс) и ря-

дового гранулированного доменного шлака. Состав бетона 1:0,5. Объемная масса пропаренного бетона составляет 950—1100 кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии 6,5—7,5 МПа. Усадка бетона с добавкой 30% рядового гранулированного шлака не превышает 0,9—1,1 мм/м [68].

В Ново-Кузнецке выпускаются безавтоклавные изделия и конструкции из газозолошлакобетона на основе доменного гранулированного шлака Кузнецкого металлургического завода и пылевидной золы Южно-Кузнецкой ГРЭС. Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона составляет портландцемента 80—90 кг; извести 70—80 кг; гипса 30 кг; золы 240 кг и гранулированного шлака до 400 кг. Водотвердое отношение находится в пределах 0,5—0,55. Пропаривание производится при 95—100°С по режиму 4+8+4 ч. Объемная масса пропаренного газобетона в сухом состоянии составляет 860—900 кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии 6,8—7,5 МПа. Усадка после пропаривания с добавкой граншлака достигает 1,4—1,6 мм/м. Результаты обследованных панелей из пропаренного газозолошлакобетона, находившихся длительное время в эксплуатации, свидетельствуют о надлежащей их долговечности.

В Ворошиловграде, Нижнем Тагиле и других городах строительные изделия из газозолошлакобетона изготавливают запариванием в автоклавах при 175°С.

Использование доменных гранулированных шлаков, обладающих повышенной гидравлической активностью в сочетании с тепловлажностной обработкой в автоклавах, способствует получению ячеистобетонных изделий с пониженной объемной массой при повышенной прочности и трещиностойкости.

Таким образом, анализ данных по производству ячеистобетонных изделий и конструкций из шлаков и зол и положительный опыт их эксплуатации позволяют надеяться на широкое внедрение эффективных материалов в строительстве.

При этом в каждом отдельном случае необходимо использовать рациональные способы обработки шлаков и зол, назначать оптимальные составы вяжущих и бетонов, применять совершенные методы формирования ячеистой структуры и определять виды и режимы тепловой обработки в зависимости от требуемых свойств бетонов и изделий.

### 3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К КОМПЛЕКСНОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ШЛАКОВ И ЗОЛ В ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Возможность использования тех или иных шлакозольных материалов и изделий определяется разнообразием свойств исходного материала, степенью готовности их для применения в строительстве и т. д. Эти различия должны быть учтены при выявлении экономической эффективности использования шлаковых и зольных материалов и изделий в строительстве. В связи с этим целесообразно шлаки и золы сгруппировать по определенным признакам:

1) по виду применяемого твердого топлива (пылевидные золы от сжигания бурых, каменных углей, антрацитов и т. п.);

2) по виду выплавляемого металла (шлаки доменные, мартеновские, цветной металлургии и т. д.

3) по химическому составу (высоко-, среднекальциевые, кислые, сверхкислые);

4) по степени стойкости (нераспадающиеся, склонные к распаду, самораспадающиеся);

5) по гидравлической активности (активные и скрытоактивные);

6) по скорости охлаждения (медленно естественно или искусственно охлажденные и быстро охлажденные).

Таким образом, эта классификация распределяет шлаки и золы по признакам, имеющим важное значение для изучения химических и физических свойств сырья, а также для выбора того или иного технологического способа производства шлакозольных материалов и изделий. В связи с этим она может удовлетворить требованиям оценки экономической эффективности их производства и применения.

В целях наиболее полного выявления экономических особенностей различных видов шлаковых и зольных материалов и изделий представляется необходимым сгруппировать их по следующим классификационным признакам;

степени освоенности производства того или иного вида шлакозольного материала или изделия, однородности технологического процесса производства (по основной технологической операции), направлению переработки

Т а б л и ц а 50. Основные экономические показатели производства вяжущих веществ

Вяжущие	Расход на 1 т		
	сырья, т	топлива, кг	электроэнергия, кВт·ч
Портландцемент марки 400 (ГОСТ 10178—62)	1,7	230	100
Известь негашеная	1,8	180	25
Гипс строительный полуводный	1,3	50	30
Шлаковые и зольные цементы марки (100—300)	1,1—1,3	60	65

шлаков и зол, назначению шлаковых и зольных материалов и изделий, области применения.

В соответствии со сказанным можно определить рациональный способ производства шлакозольных полуфабрикатов — шлаковых и зольных вяжущих и заполнителей для ячеистых бетонов и производство шлакозольных ячеистобетонных изделий с технико-экономической оценкой. Так, гранулированный шлак и пылевидные золы являются основным сырьем для шлакозольных вяжущих и заполнителей в ячеистых бетонах. Анализируя технико-экономические показатели грануляционных установок, можно установить, что себестоимость 1 т гранулированного шлака, в зависимости от способа его получения и объемов производства, находится в пределах 1—2 р за 1 т, а удельные капитальные вложения составляют 0,8—0,42 р/т. Стоимость 1 т пылевидной золы с транспортными и погрузо-разгрузочными работами составляет 0,7—1,5 р.

Как известно, стоимость вяжущих веществ в современных бетонах составляет в среднем 40—50% общей стоимости всех материалов, идущих на изготовление бетона. В связи с этим возникает вопрос о выборе и применении вяжущих веществ, наиболее эффективных в технико-экономическом отношении.

Приведенные в табл. 50 данные показывают, что наиболее экономичными по затратам сырья, топлива и электроэнергии являются шлаковые и зольные вяжущие



вещества, получаемые из гранулированных шлаков — отходов металлургической, химической промышленности и топливных шлаков и зол. При этом следует подчеркнуть, что по сравнению с портландцементом для производства этих вяжущих требуется в 2—2,5 раза меньше капиталовложений.

Существующая технология производства шлаковых и зольных вяжущих веществ, сводящаяся в основном к дроблению (при кусковых материалах), сушке и помолу входящих компонентов, предопределяет возможность быстрой организации сушильно-помольных установок с минимальными капиталовложениями и минимальными строительными объемами зданий. И в этом отношении рассматриваемые вяжущие во много раз эффективнее портландцемента, для производства которого необходимы подготовительные сырьевые отделения и обжиговые установки со значительными удельными затратами металла.

Таким образом, для удешевления ячеистобетонных изделий необходимо максимально использовать местные вяжущие и, в первую очередь, шлаковые и зольные вяжущие при тепловой обработке изделий.

Исследованиями Гипроцемента показано, что в качестве активной минеральной добавки к клинкеру может быть использована пылевидная зола Томской ГРЭС-2, Иркутской ТЭЦ-1 на Яшкинском и Чернореченском, Ангарском и других цементных заводах.

Однако для производства цементов особый интерес представляет продукт жидкого шлакоудаления котлоагрегатов электростанций, содержащих в основном алюмосиликатное стекло, обладающее высокой пуццоланической активностью и незначительным содержанием негоревшего угля.

Топливный гранулированный шлак может быть использован в производстве шлакопортландцемента взамен доменного гранулированного шлака, а также в производстве бесклинкерного известковошлакового вяжущего. Так гранулированный шлак Назаровской ГРЭС был применен на Красноярском цементном заводе.

Изготовленный шлакопортландцемент с 30—35% шлака Назаровской ГРЭС имел марку 300. Замена Новокузнецкого доменного шлака топливным позволила снизить стоимость 1 т цемента на 1,5—2 р за счет снижения транспортных затрат. Это составляет экономиче-

ский эффект в размере 300—400 тыс. р. в год на Красноярском цементном заводе.

Стоимость шлаковых и зольных цементов в настоящее время колеблется в значительных пределах (6—12 р/т), что обуславливается небольшим масштабом и примитивностью производства. По проекту помольной установки мощностью в 100 тыс. т в год себестоимость шлакового цемента определена в 6 р/т. На крупных предприятиях мощностью 200—400 тыс. т в год себестоимость продукции не превысит 3—5 р/т.

Рациональное использование шлаковых и зольных отходов выгодно еще и потому, что на их удаление с территории металлургических предприятий и электростанций затрачиваются значительные материальные и трудовые ресурсы, а стоимость транспортирования в отвалы достигает 0,5—1 р/т. При получении из этих отходов ценных для строительства материалов и изделий указанные затраты частью отпадут, частью же войдут в стоимость полезной продукции.

В качестве тонкодисперсных заполнителей в ячеистых бетонах целесообразно использовать также молотые гранулированные шлаки или пылевидные золы. Расход электроэнергии на помол 1 т шлака, золы составляет 30—20 кВт·ч. Стоимость погрузо-разгрузочных работ и транспортирования сырья находится в пределах 0,6—0,8 р. Таким образом, общая стоимость тонкодисперсного заполнителя — молотого гранулированного шлака, золы находится в пределах от 1,5 до 2,5 р. за 1 т.

В качестве структурообразующей добавки в ячеистом бетоне могут быть использованы также шлакозольные материалы: рядовой гранулированный шлак, шлаковая пемза или заполнители из золы в виде агломерата, зольного обжигового и безобжигового гравия и др. при стоимости 1 м<sup>3</sup> от 1 до 3 р.

Комплексное использование шлаков и зол в производстве ячеистобетонных ограждающих конструкций для жилищного и промышленного строительства в Ангарске, Иркутске, Ступине, Норильске, Днепропетровске, Нарве и др. позволило снизить стоимость 1 м<sup>2</sup> стены до 9—11 р. При производстве теплоизоляционных изделий из газопеношлакозолобетона в Березовске, Тамбове, Свердловске, Ангарске, Курахово и др. стоимость 1 м<sup>3</sup> изделий составляет 7—9 р.

В общем виде экономическая эффективность ис-

**Таблица 51. Области экономической эффективности использования шлаков и зол**

Область применения	Заменяемый материал	Удельный экономический эффект по проведенным затратам	
		на единицу применяемого материала	на 1 т (шлака) золы, р.
1	2	3	4
<b>Вяжущие</b>			
Портландцемент с использованием золы (шлака) в качестве добавки	Часть цементного клинкера	0,5—0,9 р/т	0,7—1,3
Местные шлакозольные вяжущие	Портландцемент марки 300	2,5—5,8 р/т	4—8,9
<b>Стеновые материалы</b>			
Панели из газозолошлакобетона $\gamma_0 = 800 \text{ кг/м}^3$ и керамзитозолобетона	Слоистые железобетонные панели, кирпич глиняный, силикатный кирпич и мелкие бетонные блоки	10—12 р/1000 шт.	25—30
газозолобетонные мелкие блоки и силикатный кирпич с использованием зол		12—15 р/1000 шт.	35—40
3. Покрытия промышленных зданий из золопенобетонных плит	Плита ПКЖ	3—3,8 р/1000 шт.	3—7,6
		2,4—3 р/м <sup>3</sup>	10—12,5

пользования шлаков и зол для производства строительных материалов и изделий по их важнейшим видам представлена в табл. 51.

На основании экономической эффективности использования шлаков и зол можно наметить следующую структуру переработки утилизируемых шлаков и зол (табл. 52).

Комплексное использование отходов металлургической, химической и энергетической промышленности в широких масштабах обеспечивает народному хозяйству большой экономический эффект. Подсчитано, что при

Таблица 52. Рациональная структура использования шлаков и зол

Область применения	Вид материала	Удельный вес, %
Стеновые материалы и изделия	Гранулированный шлак, шлаковая пемза, зольный гравий, аглопорит, аглопорит гравиеподобной формы; теплоизоляционные материалы; зола-заполнитель; кирпич, блоки из золы или шлака; шлакозольные ячеистые изделия и конструкции	50
Неорганические вяжущие	Известково-сланцевый цемент, шлакозолопортландцемент, известково-шлако-зольный цемент	20
Дорожное строительство	Плотные заполнители для дорожного и аэродромного строительства; грунтостабилизированные массы	10
Специальные бетоны	Активная зольная и шлаковая добавка к гидротехническому бетону, добавка к жароупорному бетону	8
Товарный шлак зола и вторичные изделия	Засыпка теплоизоляции, подсыпка в дорогах, литые, плотные и пористые изделия	12

использовании 60 млн. т отходов экономия приведенных затрат составит более 720 млн. р. Весьма значительный эффект достигается от сокращения капитальных вложений на развитие материально-технической базы строительства, а также от ликвидации золошлаковых отвалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровский С. В. Некоторые особенности усадки бетона. «Бетон и железобетон», 1959, № 4
2. Алешин С. Н. и др. Производство газозолобетонных панелей с термообработкой электропрогревом. М., Стройиздат, 1971.
3. Баранов А. Т., Бахтияров К. И. Влияние качества межпустотного материала и пористой структуры на долговечность ячеистого бетона. «Строительные материалы», 1968, № 5.
4. Башев Ф. П. Получение гидравлического зольного вяжущего из сланцевой золы Сызранской ТЭЦ. Автореферат диссертации. М., 1961.
5. Беркман А. С., Мельникова И. Г. Структура и морозостойкость стеновых материалов. М., 1962.
6. Боженов П. И. Комплексное использование минерального сырья для производства строительных материалов. М.—Л., Госстройиздат, 1963.
7. Боженов П. И., Кавалерова В. И., Григорьев Б. А. Исследование влияния продолжительности снижения температуры пара на прочность автоклавных материалов и фазовый состав гидросиликатов кальция.
8. Брайнина Е. Ю. Производственная и эксплуатационная влажность газобетонных стеновых панелей. Материалы семинара в Вильнюсе, 1965.
9. Бугрим С. Ф. Стеновые панели из керамзитогазобетона. КОМИ книжное издательство. Сыктывкар, 1966.
10. Будников П. П., Значко-Яворский И. Л. Гранулированные доменные шлаки и шлаковые цементы. М., Промстройиздат, 1953.
11. Бутт Ю. М., Рашкович Л. Н. Твердение вяжущих при повышенных температурах. М., Стройиздат, 1965.
12. Вегенер Р. В. Электропрогрев бетонных и железобетонных конструкций. М., Госстройиздат, 1953.
13. Вейник А. И. Основные закономерности процессов тепло- и массообмена в строительных ограждениях. — Сб. «Сушка и увлажнение строительных материалов и конструкций». Профиздат, 1958.
14. Виноградов Б. Н. Сырье для производства автоклавных силикатных бетонов. М., Стройиздат, 1966.
15. Виноградов Б. Н., Гладких К. В. Использование высококальциевых пылевидных зол в производстве изделий из неавтоклавного газозолобетона. — Сб. «Применение металлургических шлаков и зол электростанций в строительстве». Кемерово, 1970.
16. Виноградов Б. Н., Гладких К. В. Требования к извести для производства ячеистых бетонов. — Сб. «Материалы 4-й конференции по ячеистым бетонам». Приволжское книжное изд-во. Саратов — Пенза, 1969.
17. Виноградов Б. Н., Гребеник Е. А., Гладких К. В. Процессы твердения вяжущих из доменных гранулированных шлаков при водотепловой обработке. «Строительные материалы», 1963, № 4.
18. Виноградов Б. Н., Сидоров Е. П. Влияние крупнокристаллической окиси кальция на прочность и структуру газосиликата. Известия АН Туркменской ССР, серия физико-технических, химических и геологических наук, № 6, 1961.
19. Волженский А. В. Водотермическая обработка строительных материалов в автоклавах. Изд-во АСИА СССР, 1944.
20. Волженский А. В. О зависимости структуры и свойств цементного камня от условий его образования и твердения. «Строительные материалы», 1964, № 4.
21. Волженский А. В., Буров Ю. С. Использование отвальных металлургических шлаков взамен извести и цемента при производстве автоклавных материалов и изделий. Доклады на республиканском совещании по вопросам использования металлургических шлаков в строительстве. АСИА УССР. Киев, 1961.
22. Волженский А. В., Буров Ю. С., Виноградов Б. Н., Гладких К. В. Бетоны и изделия на шлаковых и зольных цементах. М., Стройиздат, 1969.
23. Волженский А. В., Гладких К. В. Использование гранулированных шлаков в качестве вяжущих веществ. Научные доклады Высшей школы. Раздел «Строительство», № 1, 1959.
24. Волженский А. В., Гладких К. В. Мелкозернистые бетоны и строительные изделия на вяжущих из топливных гранулированных шлаков. «Строительные материалы», 1960, № 10.
25. Волженский А. В., Гладких К. В. О некоторых путях улучшения ячеистобетонных изделий. «Строительные материалы», 1964, № 12.
26. Волженский А. В., Гладких К. В., Виноградов Б. Н. Исследование процессов твердения вяжущих на основе гранулированных топливных шлаков. «Строительные материалы», 1960, № 6.
27. Волженский А. В., Гладких К. В. и др. Газошлакобетоны, получаемые термообработкой в пропарочных камерах. «Строительные материалы», 1962, № 6.

28. Волженский А. В., Гладких К. В., Юдина А. М. Искусственные безобжиговые заполнители для легких и ячеистых бетонов. Известия высших учебных заведений. «Строительство и архитектура», 1969, № 3.
29. Волженский А. В. и др. Получение тяжелых бетонов на основе отвалной шлакозольной смеси ТЭЦ-22. XXXII научно-техн. конф. МИСИ строительного факультета. Тезисы докладов (28—30 марта). М., 1973.
30. Волженский А. В. и др. Инструкция по производству автоклавных материалов и изделий с применением шлаков и зол в качестве вяжущих веществ (на песчаном заполнителе). ЦНИИС АСиА СССР, 1961.
31. Волженский А. В., Гладких К. В. и др. Шлаки и золы в производстве ячеистобетонных изделий. «Строительные материалы», 1969, № 8.
32. Волженский А. В., Чистов Ю. Д. О процессах твердения цемента и их влиянии на микроструктуру и некоторые физические и механические свойства образующегося камня. VI конгресс по бетону и железобетону, вторая секция, Сборник № 1. М., Стройиздат, 1966.
33. Временные рекомендации по использованию тонкодисперсной золы ТЭС в качестве добавки для приготовления бетонов. М., 1973.
34. Гладких К. В. Вяжущие вещества и мелкозернистые бетоны на основе топливных гранулированных шлаков. Автореферат диссертации, 1962.
35. Гладких К. В., Данилович И. Ю. Электротермический способ тепловой обработки шлакозольных ячеистобетонных изделий. Материалы Всесоюзного научно-технического совещания по новой технике и прогрессивной технологии в процессах сушки. М., 1969.
36. Глушнев С. В. Производство легкого пористого заполнителя из золы ТЭС. — В кн.: «Использование отходов и попутных продуктов для изготовления строительных материалов, изделий и конструкций. Реф. инф. № 5, М., ВНИИЭСМ, 1973, с. 34—35.
37. Горчаков Г. И., Капкин М. М., Скрамтаев Б. Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. М., Стройиздат, 1965.
38. Горяйнов К. Э., Векслер Е. С. Деструкция в твердеющем бетоне и силикатных материалах при гидротермальной обработке. Сб. «Исследование влияния режима «гидротермальной обработки на свойства силикатных материалов». Респ. Дом научно-технической пропаганды. Таллин, 1966.
39. Горяйнов К. Э., Заседателев И. Б. Исследование теплофизических процессов при автоклавной обработке газобетона. Сб. трудов НИИ по строительству. Технология теплоизоляционных материалов. М., Госстройиздат, 1962.
40. ГОСТ 2544—44. Вяжущие вещества, известково-шлаковое, известково-пуццолановое, известково-глинистое, известково-зольное.
41. ГОСТ 11118—65. Панели из автоклавного ячеистого бетона для наружных стен жилых и общественных зданий. Технические требования.
42. ГОСТ 11690—66. Панели из автоклавных ячеистых бетонов для наружных стен производственных зданий.
43. Грахова С. К., Козлова В. К. и Ришес А. В. О возможности использования золы Барнаульских ТЭЦ в производстве строительных материалов. — В кн.: Строительные материалы и конструкции. Строительная механика. Труды Алтайского политехнического института им. И. И. Ползунова, вып. 21. Барнаул, 1972.
44. Грозденская Е. С., Виноградов Б. Н. Автоклавные материалы и изделия из бетонов на основе лесса. М., Стройиздат, 1973.
45. Грюнер Г. Ф., Раннамяш Л. О структурных изменениях в цементирующем камне силикатного бетона при нагревании. Сб. трудов Гос. Н-И и проект. институтов силикатного бетона автоклавного твердения, № 3, 1968.
46. Гумуляускас А. Д., Павлюк Г. Исследование трещиностойкости изделий из ячеистых бетонов. Сб. «Крупноразмерные изделия из бетонов автоклавного твердения». Материалы Всесоюзного совещания, декабрь 1969 г. М., 1969.
47. Данилов Н. Н., Бочаров В. И. Применение инфракрасных лучей при производстве сборных железобетонных конструкций и деталей. М., Госстройиздат, 1960.
48. Дмитриевич А. Д. Тепло- и массообмен при твердении бетона в паровой среде. М., Стройиздат, 1967.
49. Емельянов А. А. К вопросу об оценке усадочности и трещиностойкости конструкций из ячеистых бетонов при сушке. Сб. «Производство и применение изделий из ячеистого бетона». М., Стройиздат, 1968.
50. Есин О. А. О природе жидких шлаков. Сб. «Вопросы шлакопереработки». Челябинск, 1960.
51. Жуков А. В. и Осадчук Я. Э. О расширении производства строительных материалов и изделий на основе зол и шлаков ТЭС. Материалы Респ. научной конференции по проблемам комплексного использования в народном хозяйстве республики отходов предприятий. Вып. 5. Киев. СОПС, 1972, с. 29—37.
52. Зисович Г. С. и др. Зола-унос в производстве стеновых материалов. «Строительные материалы», 1972, № 5.

53. Зола-унос тепловых электростанций как добавка в бетоны. Технические условия ТУ 34-4013-73. М., 1974 (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева).
54. Иванов И. А. Исследование зол электростанций Западной Сибири с целью комплексного использования в строительстве. Автореферат диссертации. Новосибирск, 1962.
55. Иванов И. А. Легкие бетоны на основе зол электростанций. М., Стройиздат, 1972.
56. Инструкция по технологии изготовления изделий из ячеистых бетонов СН 277-70. М., Стройиздат, 1971.
57. Кивисельг Ф. П. Производство и применение строительных деталей из сланцезольного газобетона-газокукермита. Госстрой Эстонской ССР. Таллин, 1964.
58. Книгина Г. И., Загоренко В. Д. Значение пластичности газобетонной смеси при формировании макроструктуры. «Строительные материалы», 1966, № 1.
59. Колосов Б. А. Промышленное использование золы тепловой эл. станции в стр-ве. «Электрические станции», 1973, № 10.
60. Кривицкий М. Я., Счастный А. Н. Линейные деформации и влажность газобетона. «Строительные материалы», 1964, № 6.
61. Левин Н. И., Гладких К. В., Хлебцов В. П., Данилович И. Ю. Исследование несущей способности панелей из неавтоклавного газозолобетона. Материалы к семинару «Проектирование конструкций из ячеистых бетонов», ч. 2. Л., 1968.
62. Левин С. Н., Меркин А. П. Производство изделий из ячеистого силикатного бетона методом вибровспучивания (доклад на семинаре преподавателей и аспирантов строительного-технологического факультета), изд. МИСИ им. В. В. Куйбышева, 1961.
63. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963.
64. Меркин А. П., Филин А. П., Земцов Д. Г. Формирование макроструктуры ячеистых бетонов. «Строительные материалы», 1963, № 12.
65. Миронов С. А., Малинина Л. А. Ускорение твердения бетона. М., Стройиздат, 1964.
66. Миронов С. А. и др. Бетоны автоклавного твердения. М., Стройиздат, 1968.
67. Мичкарева В. М. Пористый безобжиговый заполнитель для легкого бетона из пылевидных зол электростанций.
68. Одинцов Б. Н., Беликова М. С. Газобетонные изделия на известково-шлаковом вяжущем. «Строительные материалы», 1952, № 6.
69. Перегудов В. В. Тепловые процессы и установки технологии полимерных строительных материалов и изделий. М., «Высшая школа», 1973.
70. Розенфельд Л. М., Нейман А. Г. Автоклавный бесцементный газошлакобетон. М., Стройиздат, 1968.
71. Сиверцев Г. Н. Классификация и характеристика шлаков как строительного сырья. Научное сообщение ЦНИИПС № 18, 1955.
72. Силаенков Е. С. Долговечность крупноразмерных изделий из автоклавных ячеистых бетонов. М., Стройиздат, 1964.
73. Скоблинская Н. Н. Набухание и усадка газосиликата. «Строительные материалы», 1966, № 4.
74. Соколов Г. В. Вяжущие на основе золошлаковой смеси Игумновской ТЭЦ. «Автомобильные дороги», 1972, № 10.
75. Сушильные процессы и аппаратура. Сб. статей под редакцией Балыгина Р. В., 1959.
76. Тейлор Х. В. Ф. Гидротермальные реакции в системе  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  и автоклавная обработка цементных и цементно-кремнеземистых продуктов. 4-й Международный конгресс по химии цемента. М., 1964.
77. Тейлор Х. В. Ф. Химия цементов. М., Стройиздат, 1969.
78. Теплотехника и теплотехническое оборудование заводов. Сушка материалов и изделий и сушильные устройства, 1964.
79. Федин А. А., Шмитко Е. И. Исследование процессов формирования макроструктуры силикатного ячеистого бетона. Сб. «Исследования по силикатным и цементным бетонам», вып. 4. Воронеж, 1969.
81. Физико-химические исследования газошлакобетона с пористым заполнителем. — В кн.: Промышленное стр-во. Сб. научных трудов. Киев, «Будівельник», 1973, с. 108—115.

82. Чернышов Е. М., Федин А. А. Об оценке трещиностойкости ячеистого бетона. Материалы 4-й конференции по ячеистым бетонам. Саратов — Пенза, Приволжское книжное изд-во, 1969.

83. Цилосани З. Н. Усадка и ползучесть бетона. Изд. АН Груз. ССР. Тбилиси, 1963.

84. Шепетов А. М. Производство местных вяжущих материалов. М., Госстройиздат, 1961.

85. Эйре А. Х. К вопросу о рациональном режиме автоклавной обработки крупных ячеистобетонных изделий. Сб. «Исследование влияние режима гидротермальной обработки на свойства силикатных материалов». Респ. Дом научно-техн. пропаганды. Таллин, 1966.

86. Элинзон М. П. Шлаки как заполнитель для легких бетонов. М., Госстройиздат, 1959.



# ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение . . . . .	3
<b>Глава I. Виды шлаков и зол и их свойства . . . . .</b>	<b>6</b>
1. Химико-минералогический состав шлаков и зол и их гидравлическая активность . . . . .	6
2. Вяжущие вещества из гранулированных шлаков и пылевидных зол . . . . .	22
<b>Глава II. Получение шлакозольных бетонов с ячеистой структурой . . . . .</b>	<b>52</b>
1. Характеристика и подготовка сырьевых материалов . . . . .	53
2. Влияние вида и расхода сырьевых материалов на свойства ячеистых бетонов . . . . .	67
3. Влияние вида и количества газообразователя . . . . .	78
4. Влияние температуры воды затворения и расхода алюминиевой пудры на свойства газобетона . . . . .	85
5. Влияние водотвердого отношения . . . . .	90
6. Способы уменьшения количества воды затворения . . . . .	95
7. Введение в ячеистый шлакозольный бетон структурообразующих добавок . . . . .	117
<b>Глава III. Способы ускорения твердения ячеистого шлакозольного бетона и влияние их на его свойства . . . . .</b>	<b>128</b>
1. Тепловлажностная обработка шлакозольных ячеистых бетонов при пропаривании (90—95° С) и запаривании (175° С и выше) . . . . .	129
2. Пропаривание шлакозольных ячеистых бетонов с последующей сушкой до равновесной влажности . . . . .	148
3. Тепловая обработка ячеистого газозолошлакобетона методом контактного электропрогрева . . . . .	155
4. Тепловая обработка газозолошлакобетона с помощью теплоэлектронагревателей . . . . .	172
5. Прочностные и деформативные характеристики ячеистых бетонов на основе шлаков и зол . . . . .	181
<b>Глава IV. Заводское изготовление и применение изделий из ячеистых бетонов на основе шлаков и зол . . . . .</b>	<b>211</b>
1. Изготовление изделий из ячеистых бетонов в заводских условиях по рекомендации МИСИ им. В. В. Куйбышева . . . . .	211
2. Изготовление изделий и конструкций из ячеистых бетонов на основе шлаков и зол на предприятиях страны . . . . .	240
3. Техничко-экономические предпосылки к комплексному использованию шлаков и зол в ячеистобетонных изделиях . . . . .	246
Список литературы . . . . .	252