

Л. А. АЛИМОВ, В. В. ВОРОНИН

**ТЕХНОЛОГИЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ  
И КОНСТРУКЦИЙ  
БЕТОНОВЕДЕНИЕ**

**УЧЕБНИК**

*Для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению «Строительство»*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2010

УДК 691:624.07(075.8)  
ББК 38.3:38.5я73  
А501

Рецензенты:

директор НИПТИ «Стройиндустрия» акад. РААСН,  
д-р техн. наук, проф. *У. Х. Магдеев*;  
зав. кафедрой строительного производства и управления недвижимостью  
Сибирского индустриального университета, д-р техн. наук, проф.,  
международный ученый XXI в. *С. И. Павленко*

**Алимов Л. А.**

А501 Технология строительных изделий и конструкций. Бетонование : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / Л. А. Алимов, В. В. Воронин. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 432 с.  
ISBN 978-5-7695-6775-9

Рассмотрены вопросы современного бетонования, технологии производства строительных изделий и конструкций различного назначения, в том числе бетонных, железобетонных, полимерных, из древесины, сухих строительных смесей, утилизации техногенных отходов, ремонт и восстановление конструкций. Описано влияние технологических факторов на формирование структуры и свойств изделий и конструкций для различных условий эксплуатации, в том числе при монолитном и сборно-монолитном строительстве.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования. Может быть полезен магистрам, аспирантам и инженерно-техническим работникам в области производства строительных изделий и конструкций.

УДК 691:624.07(075.8)  
ББК 38.3:38.5я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается*

© Алимов Л. А., Воронин В. В., 2010  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010  
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

ISBN 978-5-7695-6775-9

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |          |
|---|----------|
| Предисловие.....  | 3        |
| <b>Глава 1. Бетоны и растворы .....</b>                                   | <b>4</b> |
| 1.1. Материалы для бетона .....   | 4        |
| 1.1.1. Портландцемент.....  | 6        |
| 1.1.2. Глиноземистый цемент .....   | 15       |
| 1.1.3. Расширяющиеся и безусадочные цементы .....                         | 16       |
| 1.1.4. Особенности определения стандартных характеристик<br>цемента ..... | 17       |
| 1.1.5. Кислотоупорный цемент.....   | 22       |
| 1.1.6. Мелкий заполнитель .....   | 22       |
| 1.1.7. Крупный заполнитель .....  | 25       |
| 1.1.8. Добавки к бетонам .....  | 30       |
| 1.2. Бетонная смесь.....  | 40       |
| 1.3. Структура бетона.....  | 47       |
| 1.4. Свойства бетона .....  | 58       |
| 1.5. Виды бетонов и строительных растворов.....                           | 80       |
| 1.5.1. Определение состава тяжелого<br>бетона.....                        | 80       |
| 1.5.2. Определение состава бетона с химическими<br>добавками .....        | 82       |
| 1.5.3. Виды бетона.....   | 86       |
| 1.5.4. Строительные растворы.....   | 96       |
| 1.5.5. Свойства растворных смесей .....                                   | 97       |
| 1.5.6. Различные виды растворов.....                                      | 101      |
| 1.6. Легкие бетоны .....  | 102      |
| 1.6.1. Легкий бетон на пористых заполнителях.....                         | 102      |
| 1.6.2. Свойства легких бетонов .....                                      | 105      |
| 1.6.3. Поризованный легкий бетон.....                                     | 111      |
| 1.6.4. Ячеистый бетон .....   | 112      |
| 1.6.5. Газобетон и газосиликат.....                                       | 113      |
| 1.6.6. Пенобетон .....  | 115      |
| 1.7. Бесцементные бетоны.....   | 117      |
| 1.7.1. Силикатный бетон.....  | 117      |
| 1.7.2. Гипсобетон.....  | 125      |
| 1.7.3. Физико-механические свойства<br>гипсобетонов .....                 | 130      |
| 1.7.4. Подбор состава гипсобетона .....                                   | 132      |

|  |     |
|--|-----|
| 1.7.5. Легкий бетон на органических<br>заполнителях..... | 136 |
|--|-----|

**Глава 2. Технологический процесс изготовления бетонных  
и железобетонных изделий.....** 138

|  |     |
|--|-----|
| 2.1. Типы бетонных и железобетонных изделий.....   | 138 |
| 2.2. Типы производственных предприятий по выпуску сборных<br>железобетонных изделий.....               | 145 |
| 2.3. Приемка и хранение вяжущих веществ<br>и заполнителей.....   | 151 |
| 2.3.1. Склады цемента и их расчет.....   | 151 |
| 2.3.2. Склады заполнителей и их расчет.....  | 156 |
| 2.3.3. Склады арматурной стали и их расчет.....  | 164 |
| 2.3.4. Склады химических добавок и горючесмазочных<br>материалов.....                                  | 165 |
| 2.3.5. Склады готовой продукции.....   | 166 |
| 2.3.10. Расчет складов готовой продукции.....  | 168 |
| 2.4. Приготовление бетонных смесей.....  | 170 |
| 2.4.1. Виды бетоносмесительных узлов.....  | 170 |
| 2.4.2. Дозирование компонентов.....  | 173 |
| 2.4.3. Перемешивание бетонных смесей.....  | 174 |
| 2.4.4. Транспортирование бетонных смесей.....  | 177 |
| 2.4.5. Приготовление бетонных смесей с использованием<br>местных материалов и техногенных отходов..... | 178 |
| 2.4.6. Расчет бетоносмесительных цехов.....  | 180 |
| 2.5. Технология изготовления арматурных изделий.....   | 184 |
| 2.5.1. Классификация арматурной стали.....   | 186 |
| 2.5.2. Изготовление арматурных ненапрягаемых<br>элементов.....   | 196 |
| 2.5.3. Технология армирования изделий предварительно-<br>напряженной арматурой.....                    | 202 |
| 2.5.4. Расчет арматурных цехов.....  | 220 |
| 2.6. Изготовление бетонных и железобетонных<br>изделий.....  | 220 |
| 2.6.1. Формы для изготовления бетонных и железобетонных<br>изделий.....                                | 221 |
| 2.6.2. Формование бетонных и железобетонных<br>изделий.....  | 225 |
| 2.6.3. Методы уплотнения бетонных<br>смесей.....   | 230 |
| 2.7. Методы ускорения твердения бетона.....  | 243 |
| 2.7.1. Тепловая обработка с использованием пара<br>низкого давления.....                               | 245 |
| 2.7.2. Контактный обогрев.....   | 251 |
| 2.7.3. Тепловая обработка в автоклавах.....  | 253 |
| 2.7.4. Электропрогрев.....   | 255 |
| 2.7.5. Гелиотермообработка бетона и железобетона.....  | 261 |

|  |            |
|--|------------|
| 2.8. Повышение заводской готовности железобетонных изделий .....   | 265        |
| <b>Глава 3. Производство бетонных и железобетонных изделий.....</b>  | <b>270</b> |
| 3.1. Агрегатно-поточный способ.....  | 270        |
| 3.2. Конвейерный способ.....   | 278        |
| 3.3. Стендовый способ .....  | 284        |
| 3.4. Технология непрерывного формования бетонных и железобетонных изделий.....                               | 292        |
| 3.5. Технология бетонных и железобетонных изделий с использованием комбинированной гелиотермообработки ..... | 296        |
| 3.6. Технология производства изделий из ячеистого бетона .....   | 300        |
| 3.7. Расчет формовочных линий.....   | 305        |
| 3.8. Расчет и выбор технологического оборудования .....  | 311        |
| 3.9. Технология производства сухих строительных смесей .....   | 315        |
| 3.10. Монолитный и сборно-монолитный железобетон.....  | 326        |
| 3.11. Вторичное использование железобетонного лома .....   | 335        |
| 3.12. Ремонт и восстановление бетонных изделий и конструкций.....  | 336        |
| <b>Глава 4. Технология производства строительных изделий и конструкций .....</b>                             | <b>345</b> |
| 4.1. Технология производства изделий из П-бетона .....   | 345        |
| 4.2. Технология производства изделий из асбестоцемента.....  | 362        |
| 4.4. Технология производства изделий и конструкций из древесины.....   | 371        |
| <b>Глава 5. Контроль качества готовой продукции.....</b>   | <b>390</b> |
| 5.1. Контроль прочности бетона .....   | 390        |
| 5.2. Контроль натяжения арматуры.....  | 396        |
| 5.3. Приемочный контроль .....   | 399        |
| 5.4. Документация производственного контроля и маркировка изделий .....                                      | 402        |
| 5.5. Сертификация бетонных и железобетонных конструкций.....   | 403        |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Глава 6. Охрана труда и обеспечение пожарной безопасности на предприятиях по производству строительных материалов и изделий</b> ..... | 408 |
| <b>Глава 7. Экология и охрана окружающей среды</b> .....   | 413 |
| Список литературы.....   | 420 |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Одними из самых массовых конструкций являются бетонные и железобетонные, применяемые в самых различных условиях. В связи с этим в данном учебнике подробно рассмотрены основы бетоноведения и технологии изготовления железобетонных изделий.

Бетоноведение включает в себя основные сведения о составе и структуре бетонных смесей, структурообразовании бетонов различных видов, свойствах бетонов. В учебнике показано влияние различных факторов (вида и качества исходных компонентов, составов, методов уплотнения и ускоренного твердения) на структуру и эксплуатационные свойства бетонов, должное внимание уделено современным методам управления структурой бетона химическими и минеральными модификаторами.

Рассмотрены также вопросы заводской технологии, включающие в себя транспортирование и складирование компонентов бетона, приготовление бетонных смесей, производство арматурных элементов, формование изделий различными способами, тепловую обработку и складирование готовых элементов. Показаны эффективные технологии производства строительных изделий и конструкций из ячеистого бетона, силикатных и газобетонов, полимербетонов. Уделено внимание производству мелкоштучных изделий, а также технологии производства сухих строительных смесей. Рассмотрены вопросы утилизации железобетонных элементов сносимых зданий и сооружений, а также вопросы ремонта и восстановления бетонных и железобетонных изделий. Показаны пути совершенствования технологии железобетонных изделий с использованием некондиционных местных материалов и отходов промышленности, подвергнутых механохимической активации.

Освещены вопросы производства слоистых изделий, а также производства объемно-модульных изделий, объемных элементов санитарно-технических кабин, трансформаторных подстанций и др. Представлена технология изделий и конструкций из древесины с использованием высокоавтоматизированных линий, клееных и сборных конструкций. Рассмотрены эффективные технологии производства строительных изделий из асбестоцемента. Уделено внимание вопросам повышения степени заводской готовности и сертификации строительных изделий, контролю и управлению качеством на заводах строительной промышленности, повышению долговечности.

## БЕТОНЫ И РАСТВОРЫ

### 1.1. Материалы для бетона

Бетон представляет собой искусственный каменный материал, получаемый в результате формования и твердения бетонной смеси, состоящей из вяжущего вещества, воды, заполнителей и специальных добавок.

Состав бетонной смеси должен обеспечить бетону к определенному сроку заданные свойства (прочность, морозостойкость, водонепроницаемость и др.).

По виду вяжущего выделяют бетоны:

- 1) цементные;
- 2) силикатные (на известково-кремнеземистом вяжущем);
- 3) на гипсовом вяжущем;
- 4) на смешанных вяжущих (цементно-известковых, известково-шлаковых и т. п.);
- 5) на специальных вяжущих (неорганических и органических), применяемые при наличии особых требований (жаростойкости, химической стойкости и др.).

По виду заполнителя различают бетоны:

- 1) на плотных заполнителях;
- 2) на пористых заполнителях;
- 3) на специальных заполнителях, удовлетворяющих специальным требованиям (защита от излучений, жаростойкости, химической стойкости и т. п.).

В правильно подобранной бетонной смеси расход цемента составляет 8... 15 %, а заполнителей — до 85 % (по массе). Поэтому в виде заполнителей применяют местные каменные материалы (песок, гравий, щебень), а также побочные продукты промышленности (например, дробленые и гранулированные металлургические шлаки).

Многие свойства бетона зависят от его плотности, на величину которой влияют плотность цементного камня, вид заполнителя и структура бетонов. По плотности бетоны подразделяются на особо тяжелые плотностью более 2 500 кг/м<sup>3</sup>; тяжелые — плотностью 1 800... 2 500 кг/м<sup>3</sup>; легкие — плотностью 600... 1 800 кг/м<sup>3</sup>; особо легкие — плотностью менее 600 кг/м<sup>3</sup>.

Легкие бетоны менее теплопроводны по сравнению с тяжелыми, поэтому их применяют преимущественно в наружных ограждающих конструкциях. В несущих конструкциях используют более плотные и прочные легкие бетоны (на пористых заполнителях и ячеистые) средней плотностью 1 200... 1 800 кг/м<sup>3</sup>.

Средняя плотность бетонов изменяется в широких пределах — от 300 до 3 600 кг/м<sup>3</sup>, поэтому и пористость может быть очень большой (70... 85 % у ячеистых теплоизоляционных бетонов) и незначительной (8... 10 % у гидротехнических бетонов).

Бетон является главным строительным материалом, который применяют во всех областях строительства. Технико-экономическими преимуществами бетона и железобетона являются низкий уровень затрат на изготовление конструкций в связи с применением местного сырья, возможность его применения в сборных и монолитных конструкциях различного вида и назначения, полная механизация и автоматизация приготовления бетона и производства сборных конструкций.

Бетонная смесь при надлежащей обработке позволяет изготавливать изделия оптимальной формы с точки зрения строительной механики и архитектуры.

Бетон долговечен и огнестоек; его среднюю плотность, прочность и другие характеристики можно изменять в широких пределах и получать материал с заданными свойствами. Недостатком бетона, как любого каменного материала, является низкая прочность на растяжение, которая в 10—15 раз ниже прочности на сжатие. Этот недостаток устраняется в железобетоне, когда растягивающие напряжения воспринимает арматура. Близость коэффициентов температурного расширения и прочное сцепление обеспечивают совместную работу бетона и стальной арматуры в железобетоне как единого целого. Благодаря этим преимуществам бетоны различных видов и железобетонные конструкции из них являются основой индустриального строительства.

*Строительный раствор* — это искусственный каменный материал, полученный в результате затвердевания растворной смеси, состоящей из вяжущего вещества, воды, мелкого заполнителя и добавок, улучшающих свойства смеси и растворов. Крупный заполнитель отсутствует, так как раствор применяют в виде тонких слоев (шов каменной кладки, штукатурка и т. п.).

Для изготовления строительных растворов чаще используют неорганические вяжущие вещества (цементы, воздушную известь и строительный гипс). В дорожном строительстве и при проведении специальных работ (устройство стяжек, защитных антикоррозионных слоев) применяются растворы, основанные на битумных и полимерных вяжущих; в состав этих растворных смесей вода не входит.

Строительные растворы подразделяются в зависимости от вида вяжущего вещества, величины средней плотности и назначения. По

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

По средней плотности различают тяжелые растворы со средней плотностью более  $1\,500\text{ кг/м}^3$ , изготавливаемые обычно на кварцевом песке; легкие растворы со средней плотностью менее  $1\,500\text{ кг/м}^3$ , изготавливаемые на пористом мелком заполнителе и с порообразующими добавками.

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

Цементные бетоны приготавливают на различных цементах и наиболее широко применяют в строительстве. Среди них основное место занимают бетоны на портландцементе и его разновидностях (около 65 % от общего объема производства), применяемые для различных видов конструкций и условий их эксплуатации, успешно используются бетоны на шлакопортландцементе и пуццолановом цементе. К разновидностям цементных бетонов относятся декоративные бетоны, изготавливаемые на белом и цветных цементах, бетоны для самонапряженных конструкций на напрягающем цементе, бетоны для специальных целей, получаемые на особых видах цемента: глиноземистом, безусадочном и т. д.

Для приготовления бетонов применяются вяжущие вещества, мелкий и крупный заполнитель, вода и добавки.

В зависимости от областей применения различают воздушные, гидравлические и кислотоупорные вяжущие. К гидравлическим вяжущим относятся портландцемент, глиноземистый цемент и их разновидности.

### 1.1.1. Портландцемент

Портландцемент получают путем совместного помола цементного клинкера и двуводного гипса. Клинкер получают путем обжига при температуре  $1\,450\text{ }^\circ\text{C}$  тщательно подобранной смеси, содержащей примерно 75...78 % известняка и 22...25 % глины. Основными минералами клинкера являются алит, белит, трехкальциевый алюминат и четырехкальциевый алюмоферрит.

*Алит* —  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (или  $\text{C}_3\text{S}$ ) — минерал, определяющий быстроту твердения, прочность и другие свойства портландцемента; он содержится в клинкере в количестве 45...60 %. Алит представляет собой твердый раствор трехкальциевого силиката и небольшого количества

(2... 4 %)  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$  и других примесей, которые могут существенно влиять на структуру и свойства.

*Белит*  $2CaO \cdot SiO_2$  (или  $C_2S$ ) — второй по содержанию (20... 30 %) силикатный минерал клинкера. Он медленно твердеет, но достигает высокой прочности в дальнейшем.

Содержание минералов-силикатов в клинкере портландцемента в сумме составляет около 75 %, поэтому гидратация алита и белита в основном определяет технические свойства портландцемента. Остальные 25 % составляет промежуточное вещество, заполняющее объем между кристаллами алита и белита. Промежуточное вещество состоит из кристаллов трехкальцевого алюмината ( $C_3A$ ) и четырехкальцевого алюмоферрита ( $C_4AF$ ).

*Трехкальциевый алюминат* в клинкере содержится в количестве 4... 12 % и при благоприятных условиях обжига получается в виде кубических кристаллов размером до 10... 15 мкм; образует твердые растворы сложного состава. Он очень быстро гидратируется и твердеет, но имеет небольшую прочность. Он также является причиной сульфатной коррозии бетона, поэтому в сульфатостойком портландцементе его содержание ограничено 5 %.

*Четырехкальциевый алюмоферрит* в клинкере содержится в количестве 10... 20 %. Алюмоферритная фаза промежуточного вещества клинкера представляет собой твердый раствор алюмоферритов кальция разного состава. По скорости гидратации минерал занимает промежуточное положение между алитом и белитом, поэтому он не оказывает определяющего влияния на скорость твердения и тепловыделение портландцемента.

Для получения портландцемента с заданными специальными свойствами используют следующие основные способы:

1) регулирование минерального состава и структуры цементного клинкера, оказывающее решающее влияние на все строительно-технические свойства цемента;

2) введение минеральных и органических добавок, позволяющих направленно изменять свойства вяжущего, экономить клинкер, уменьшать расход цемента в бетоне;

3) регулирование тонкости помола и зернового состава цемента, влияющих на скорость твердения, активность, тепловыделение и другие свойства цемента.

Тонкость помола цемента оценивается путем просеивания предварительно высушенной пробы цемента через сито с сеткой № 008. Тонкость помола должна быть такой, чтобы через указанное сито проходило не менее 85 % массы просеиваемой пробы; при этом удельная поверхность цемента составляет обычно 250... 300 м<sup>2</sup>/г.

Плотность портландцемента (без минеральных добавок) составляет 3,05... 3,15 г/см<sup>3</sup>. Его средняя насыпная плотность у рыхлого цемента составляет 1 100 кг/м<sup>3</sup>, у сильно уплотненного — до 1 600 кг/м<sup>3</sup>; в среднем — 1 300 кг/м<sup>3</sup>.

Стандартная консистенция цемента определяется количеством воды (в процентах от массы цемента), необходимой для получения цементного теста нормальной густоты. Нормальной густотой цементного теста считают такую его подвижность, при которой цилиндр — пестик прибора Вика, погруженный в кольцо, заполненное тестом, не доходит на 5...7 мм до пластинки, на которой установлено кольцо.

Стандартная консистенция портландцемента может составлять от 22 до 28 %. При введении активных минеральных добавок осадочно-го происхождения (диатомита, трепела, опоки) водопотребность цемента повышается и может достигнуть 32...37 %.

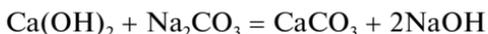
Сроки схватывания и равномерность изменения объема цемента определяют в тесте нормальной густоты. Сроки схватывания определяют с помощью прибора Вика путем погружения иглы в тесто нормальной густоты. *Начало схватывания* — время, прошедшее от начала затворения до того момента, когда игла не доходит до пластинки на 1...2 мм.

*Конец схватывания* — время, прошедшее от начала затворения до того момента, когда игла погружается в тесто не более чем на 1 мм. Начало схватывания цемента должно наступать не ранее 45 мин, а конец схватывания — не позднее 10 ч от начала затворения.

Для получения нормальных сроков схватывания при помолу клинкера на цементном заводе вводят добавку двуводного гипса в количестве 3...5 %. Замедление схватывания объясняется отложением на зернах цемента тонких пленок гидросульфалоумината кальция, образовавшегося при взаимодействии введенного сульфата кальция с трехкальциевым алюминатом. Эти пленки замедляют диффузию воды к цементным зернам, и скорость их гидратации уменьшается.

Замедлителями схватывания служат также фосфаты, нитраты кальция, натрия и аммония, сахар. Сахар образует с гидроксидом кальция легко растворимый сахарат кальция, наличие которого увеличивает концентрацию ионов кальция, поэтому процесс гидролиза трехкальциевого силиката подавляется, а схватывание происходит медленнее. При большой добавке сахара бетон не твердеет.

Ускорителями схватывания портландцемента являются карбонаты щелочных металлов и хлориды. Они образуют при взаимодействии с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидролизе трехкальциевого силиката, труднорастворимые соединения. Так действует, например, карбонат натрия:



В результате химической реакции образуется малорастворимый карбонат кальция, гидроксид кальция выводится из сферы реакции и процесс гидролиза трехкальциевого силиката ускоряется.

Влияние хлористого кальция на сроки схватывания портландцемента зависит от дозировки. При введении в бетонную смесь в обыч-

ной дозировке 1...2 % от массы цемента хлористый кальций мало влияет на сроки схватывания, но существенно повышает начальную прочность бетона, т. е. действует как ускоритель твердения. При использовании в качестве противоморозной добавки хлористый кальций может вводиться в больших количествах; тогда он ускоряет схватывание и бетонную смесь рекомендуется затворять на холоде, чтобы избежать преждевременного загустевания.

Один из методов ускорения процессов схватывания и твердения заключается во введении добавок, являющихся центрами кристаллизации, например в виде заранее приготовленного измельченного гидратированного цемента.

Равномерность изменения объема определяют следующим образом: изготовленные из теста нормальной густоты образцы-лепешки через 24 ч предварительного твердения выдерживают в течение 3 ч в кипящей воде. Лепешки не должны деформироваться, не допускаются также радиальные трещины. Причиной неравномерного изменения объема цементного камня являются местные деформации, вызываемые расширением свободной  $\text{CaO}$  и периклаза  $\text{MgO}$  вследствие их гидратации.

Активность и марку цемента определяют испытанием стандартных образцов-призм размером  $4 \times 4 \times 16$  см, изготовленных из цементно-песчаной растворной смеси состава 1:3 (по массе). Для испытаний применяется стандартный монофракционный песок. Раствор готовят с количеством воды, обеспечивающим распыл стандартного конуса на встряхивающем столике, равном диаметру 106...115 мм. Уплотнение растворной смеси производят на стандартной виброплощадке.

Через 28 сут твердения (первые сутки образцы твердеют в формах во влажном воздухе, а затем 27 сут — в воде комнатной температуры) образцы-призмы сначала испытывают на изгиб, затем получившиеся половинки призм испытывают на сжатие. *Активностью* называют предел прочности при осевом сжатии половинок балочек, испытанных в возрасте 28 сут. В зависимости от активности с учетом предела прочности при изгибе портландцементы подразделяются на марки М400, М500, М550 и М600. У быстротвердеющих портландцементов нормируется не только 28-суточная прочность, но и начальная, 3-суточная.

**Быстротвердеющий портландцемент.** Быстротвердеющий портландцемент (БТЦ) — портландцемент с минеральными добавками, отличающийся повышенной прочностью через 3 сут твердения. Количество трехкальциевого силиката и трехкальциевого алюмината в клинкере составляет обычно не менее 60...65 %. Помол БТЦ производится более тонко до удельной поверхности 350...400  $\text{м}^2/\text{кг}$  (вместо 280...300  $\text{м}^2/\text{кг}$  для обычного портландцемента). Это ускоряет твердение цемента. БТЦ выпускают марок М400 и М500.

Быстротвердеющий портландцемент применяется при производстве сборных железобетонных конструкций, а также при проведении

зимних бетонных работ. Следует иметь в виду повышенное тепловыделение БТЦ, которое исключает его применение для массивных конструкций. БТЦ с повышенным содержанием трехкальциевого алюмината непригоден для бетона, подвергающегося сульфаталюминатной коррозии.

**Сульфатостойкий портландцемент.** Сульфатостойкие цементы изготовляют на основе клинкера нормированного минерального состава (с пониженным содержанием  $C_3S$  — не более 50 % — и  $C_3A$  — не более 5 %) и применяют для изготовления бетонных и железобетонных конструкций, обладающих коррозионной стойкостью при воздействии сред, агрессивных по содержанию в них сульфатов. Эти цементы по вещественному составу подразделяются на следующие виды: сульфатостойкий портландцемент М400, сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками М400 и М500, сульфатостойкий шлакопортландцемент М300 и М400, пуццолановый портландцемент М300 и М400.

**Портландцементы с органическими добавками.** В современной технологии бетона широко применяют поверхностно-активные вещества, вводимые в малых дозах (0,05...0,30 % от массы цемента) в бетонные и растворные смеси при их изготовлении и добавляемые в цемент при помолке клинкера.

Поверхностно-активные добавки пластифицируют бетонные и растворные смеси, что позволяет улучшать их удобоукладываемость, либо снижают количество воды затворения (сохраняя удобоукладываемость) и расход цемента на 10...20 %. Оставляя же количество цемента неизменным, достигают снижения пористости бетона, повышения его морозостойкости и водонепроницаемости.

Типичные поверхностно-активные добавки можно подразделить на четыре группы: гидрофилизующие, гидрофобизирующие, воздухововлекающие и комплексные.

К *гидрофилизующим добавкам* относятся лигносульфонаты технические (ЛСТ), получаемые при производстве целлюлозы. При адсорбции цементом лигносульфонат кальция гидрофилизует частицы цемента, т.е. улучшает их смачивание водой. Одновременно ослабевают силы взаимного сцепления между частицами вяжущего. В результате этого добавка ЛСТ повышает пластичность цементного теста и подвижность бетонных смесей.

К *гидрофобизирующим добавкам* относятся мылонафт, асидол, асидол-мылонафт, синтетические жирные кислоты и их соли и кремнийорганические жидкости (ГКЖ-10, ГКЖ-11, ГКЖ-94).

Мылонафт представляет собой натриевое мыло нафтеновых кислот. Общая формула нафтеновых кислот  $C_nH_{2n-1}COOH$ , где  $n$  изменяется от 8 до 13. Источником получения нафтеновых кислот служат щелочные отходы, образующиеся при очистке продуктов перегонки нефти (бензина и др.) щелочью. Из них получают технические нафтеновые кислоты, известные под названием «асидол» и «асидол-

мылонафт». Синтетические жирные кислоты изготовляют путем окисления парафина. Можно применять в качестве добавки как синтетические жирные кислоты, так и кубовые остатки, полученные при производстве этих кислот.

Молекулы нафтеновых кислот и их солей состоят из полярной группы (COOH или COONa) и углеводородного радикала. Эти молекулы адсорбируются на частицах цемента так, что их углеводородные радикалы обращены наружу. Они не смачиваются водой и придают цементу гидрофобные свойства.

Жидкости ГКЖ-10 и ГКЖ-11 представляют собой водно-спиртовые растворы метил- и этилсиликоната натрия, способные смешиваться с водой в любых соотношениях. Кремнийорганическая жидкость ГКЖ-94 — продукт гидролиза этилдиохлорсилана; ГКЖ-94 обычно применяют в виде водной эмульсии.

Из добавок микропенообразователей наиболее известны абиетат натрия и омыленный древесный пек. Абиетат натрия получают путем омыления канифоли едким натром (поэтому его называют смолой нейтрализованной, воздухововлекающей (СНВ)). Омыленный древесный пек представляет собой нейтрализованные щелочью смоляные кислоты древесного пека хвойных пород. Микропенообразователи образуют при перемешивании бетонной смеси пену, вовлекая воздух, т. е. действуют как *воздухововлекающие добавки*.

*Комплексные добавки*, получившие широкое распространение, обычно состоят из гидрофилизующих и гидрофобизирующих поверхностно-активных веществ. Они сочетают в себе высокий пластифицирующий эффект с гидрофобизирующим действием на цементы и бетоны.

Пластифицированный портландцемент изготовляют путем введения при помеле клинкера около 0,25 % сульфитно-дрожжевой бражки (СДБ) (считая на сухое вещество). Он отличается от обычного портландцемента способностью придавать растворным и бетонным смесям повышенную подвижность. Пластифицирующий эффект используется для уменьшения водоцементного отношения и повышения плотности, морозостойкости и водонепроницаемости бетона. Если же сохранить водоцементное отношение (В/Ц), то можно снизить расход цемента (примерно на 10... 15 %) без ухудшения качества бетона.

Гидрофобный портландцемент получают, вводя при помеле клинкера 0,1... 0,2 % мылонафта, асидола, синтетических жирных кислот, их кубовых остатков и других гидрофобизирующих веществ. Он обладает пониженной (по сравнению с обычным цементом) гигроскопичностью, лучше сохраняет свою активность при хранении и перевозках. Гидрофобный портландцемент пластифицирует бетонные и растворные смеси, повышает морозостойкость и водонепроницаемость бетона.

**Портландцементы с минеральными добавками.** *Активными минеральными добавками* называются природные или искусственные

вещества, которые при смешении в тонкоизмельченном виде с воздушной известью и затворении водой образуют тесто, способное после твердения на воздухе продолжать твердеть и под водой.

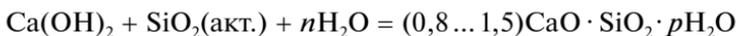
Активные минеральные добавки (называемые также гидравлическими добавками) содержат диоксид кремния в аморфном, а следовательно, в химически активном состоянии и способны поэтому взаимодействовать с гидратом оксида кальция, образуя гидросиликаты кальция.

Активные минеральные добавки могут быть природными (естественными) и искусственными. В качестве природных активных добавок широко используют горные породы (диатомит, трепел, опоку, горелые глинистые породы — глиежи), а также породы вулканического происхождения (вулканический пепел, туф, пемзу, витрофиур, трасс). Искусственные активные минеральные добавки представляют собой побочные продукты и отходы промышленности: быстроохлажденные (гранулированные) доменные шлаки; белитовый (нефелиновый) шлам — отход глиноземного производства, содержащий в своем составе до 80 % минерала белита (двукальциевого силиката); зола-унос — отход, получившийся при сжигании твердого топлива в пылевидном состоянии и улавливаемый электрофильтрами и другими устройствами.

Активная минеральная добавка химически связывает растворимый в воде гидрат оксида кальция, выделяющийся при твердении портландцемента; при этом повышается плотность цементного камня, увеличивается его сопротивление коррозии. Поэтому активные минеральные добавки применяются для повышения плотности, водостойкости и солестойкости бетонов и растворов.

Портландцемент с минеральной добавкой содержит активную минеральную добавку в количестве 10...20 % (от массы цемента), имеет те же марки, что и портландцемент, и близок к нему по другим свойствам.

Пуццолановый портландцемент изготавливают путем совместного помола клинкера и активной минеральной добавки с необходимым количеством гипса. Добавок осадочного происхождения (диатомита, трепела, опоки) должно быть не менее 20 и не более 30 %, а вулканических добавок (пемзы, туфа), а также глиежа или топливной золы — не менее 25 и не более 40 %. Активная минеральная добавка сначала адсорбирует, а затем химически связывает гидрат оксида кальция, образующийся при взаимодействии алита с водой:



В результате этого процесса, происходящего во влажных условиях и при положительной температуре, растворимый гидрат оксида кальция связывается в практически нерастворимый гидросиликат кальция. Вследствие этого значительно возрастает стойкость бетона в отношении выщелачивания  $\text{Ca(OH)}_2$ . Пуццолановый портландцемент

следует применять для бетонов, постоянно находящихся во влажных условиях (подводные и подземные части сооружений). На воздухе бетон на пуццолановом портландцементе дает большую усадку и в сухих условиях частично теряет прочность, что объясняется выветриванием воды из гидратных соединений. Кроме того, бетоны на этом цементе имеют низкую морозостойкость и не годятся для сооружений, подвергающихся замораживанию и оттаиванию. Пуццолановый портландцемент твердеет в нормальных условиях медленнее, чем портландцемент, поэтому его не следует применять при проведении зимних бетонных работ.

Пуццолановый портландцемент обладает небольшим тепловыделением и часто применяется для бетонов внутренних частей массивных сооружений (плотин, шлюзов и т. п.).

**Шлакопортландцемент.** Шлакопортландцемент представляет собой гидравлическое вяжущее вещество, твердеющее в воде и на воздухе. Он получается путем совместного тонкого помола клинкера и гранулированного доменного (или электротермофосфорного) шлака с необходимым количеством гипса. Допускаются раздельный помол компонентов и их последующее смешение. Количество доменного шлака в шлакопортландцементе должно быть не менее 21 и не более 60 % (от массы цемента). Допускается замена до 10 % шлака трепелом или другой активной минеральной добавкой.

Доменные шлаки по своему химическому составу напоминают цементный клинкер. В них преобладают оксиды: 30... 50 %  $\text{CaO}$ ; 28... 30 %  $\text{SiO}_2$ ; 8... 24 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 1... 3 %  $\text{MnO}$ ; 1... 18 %  $\text{MgO}$ , общее содержание которых достигает 90... 95 %. Гидравлическая активность шлаков характеризуется модулями основности ( $\text{Mo}$ ) и активности ( $\text{Mg}$ ).

Модуль основности представляет собой отношение содержащихся в шлаке основных оксидов ( $\% \text{CaO} + \% \text{MgO}$ ) к сумме кислотных оксидов ( $\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3$ ).

В зависимости от модуля основности различают основные шлаки, у которых модуль основности больше 1, и кислые шлаки, у которых модуль основности меньше 1. Более активными являются основные шлаки. Гидравлическая активность доменных шлаков возрастает при увеличении модуля активности.

Шлак, применяемый в качестве добавки к цементу, обязательно подвергается быстрому охлаждению водой или паром. Эта операция называется *грануляцией*, так как в процессе быстрого охлаждения шлаковый расплав распадается на отдельные зерна (гранулы). Быстрое охлаждение препятствует кристаллизации шлака, и он получается в стеклообразном и тонкозернистом химически активном состоянии. Поэтому гранулированный шлак является активным компонентом шлакопортландцемента, он взаимодействует с гидратом оксида кальция с образованием низкоосновных гидросиликата и гидроалюмината кальция. Процесс твердения шлакопортландцемен-

та значительно ускоряется при тепловлажностной обработке, поэтому его эффективно применять в сборных изделиях, изготавливаемых с пропариванием.

Незначительное содержание в цементном камне  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  повышает стойкость шлакопортландцемента в мягких и сульфатных водах по сравнению с портландцементом. Тепловыделение при твердении шлакопортландцемента в 2—2,5 раза меньше, чем у портландцемента, поэтому он является самым подходящим цементом для бетона массивных конструкций. Шлакопортландцемент отличается от пуццоланового портландцемента умеренной водопотребностью, более высокими воздухо- и морозостойкостью. Он успешно применяется как для надземных, так и для подземных и подводных частей сооружений. Стоимость его на 15...20 % ниже стоимости портландцемента.

Жаростойкость шлакопортландцемента значительно выше, чем у портландцемента, поэтому он широко используется для изготовления жаростойких бетонов. Однако шлакопортландцементу присущ тот же недостаток, что и пуццолановому портландцементу — он медленно набирает прочность в первое время твердения, особенно при пониженных температурах. Этот недостаток устраняется в быстротвердеющем шлакопортландцементе, который обладает более интенсивным увеличением прочности, чем обычный шлакопортландцемент. Обычный шлакопортландцемент выпускают марок М300, М400 и М500.

Быстротвердеющий шлакопортландцемент М400 за 3 сут твердения должен приобрести прочность при сжатии не менее 20 МПа, при изгибе — не менее 3,5 МПа. Этот вид цемента эффективно применять в производстве бетонных и железобетонных изделий, изготавливаемых с применением тепловлажностной обработки.

**Белый и цветные портландцементы.** Клинкер белого цемента изготавливают из чистых известняков и белых глин, почти не содержащих оксидов железа и марганца, которые придают обычному портландцементу зеленовато-серый цвет. Обжигают сырьевую смесь на беззольном (газовом) топливе. При помоле клинкера предохраняют цемент от попадания в него частиц железа.

В качестве эталона для определения степени белизны применяют молочное матовое стекло типа МС-14 с коэффициентом отражения не менее 95 %. Степень белизны, определяемая коэффициентом отражения абсолютной шкалы, должна быть для белого портландцемента 1-го сорта — не ниже 80 %; 2-го сорта — 75 %; 3-го сорта — 68 %; цемент выпускают марок М400 и М500.

Цветные декоративные портландцементы получают, примешивая к белому цементу щелочестойкие пигменты (охру и др.).

**Тампонажный портландцемент.** Тампонажный портландцемент изготавливают измельчением клинкера, гипса и добавок. Он предназначен для цементирования нефтяных и газовых скважин. Цемент для холодных скважин испытывают при температуре  $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ , для

горячих скважин — при температуре  $(75 \pm 3)^\circ\text{C}$ . Основная прочностная характеристика цемента — предел прочности при изгибе образцов-балочек размером  $4 \times 4 \times 16$  см, изготовленных из цементного теста с В/Ц = 0,5. Предусмотрен выпуск специальных разновидностей тампонажного портландцемента: утяжеленного, песчанистого, солевой, низкоигроскопичного.

### 1.1.2. Глиноземистый цемент

*Глиноземистый цемент* — быстротвердеющее и высокопрочное гидравлическое вяжущее вещество, получаемое путем тонкого измельчения клинкера, содержащего преимущественно низкоосновные алюминаты кальция. Однокальциевый алюминат  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  определяет быстрое твердение и другие свойства глиноземистого цемента. В сравнительно небольших количествах в нем также содержатся другие алюминаты кальция, например  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ . Влияние на качество цемента оказывает алюмосиликат кальция — геленит  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ . Силикаты кальция представлены небольшим количеством белита.

Для получения клинкера глиноземистого цемента в качестве главных компонентов сырьевой смеси берут известняк  $\text{CaCO}_3$  и породы, содержащие глинозем, например бокситы. Сырьевую смесь подвергают спеканию (при температуре около  $1300^\circ\text{C}$  или плавлению (при  $1400^\circ\text{C}$ ); при этом в результате химических реакций, проходящих между составными частями сырьевой смеси, получают глиноземистый клинкер. Этот клинкер размалывается труднее, чем клинкер портландцемента: на операцию помола затрачивается больше электроэнергии, мелющих тел и т. д. Кроме того, сами бокситы представляют собой ценное сырье, используемое для производства алюминия. Эти и другие обстоятельства повышают стоимость глиноземистого цемента, ограничивают его выпуск.

Сырьевая база для выпуска глиноземистого цемента может быть расширена путем использования некоторых отходов промышленности, содержащих в своем составе глинозем. Разработан способ производства глиноземистого цемента путем плавки в доменной печи бокситовой железной руды с добавкой известняка и железного лома. При этом доменная печь одновременно выдает чугун и шлак, представляющий собой клинкер глиноземистого цемента.

Глиноземистый цемент обладает высокой прочностью только в том случае, если он твердеет при умеренных температурах — не выше  $25^\circ\text{C}$ . Поэтому глиноземистый цемент нельзя применять для бетонирования массивных конструкций из-за разогрева бетона, а также подвергать тепловлажностной обработке. При обычных температурах (до  $25^\circ\text{C}$ ) в процессе твердения глиноземистого цемента образуется высокопрочное вещество — двухкальциевый гидроалюминат:



Двухкальциевый гидроалюминат выделяется в виде пластинчатых гексагональных кристаллов, а гидроксид алюминия представляет собой гелевидную массу.

Если же температура бетона превышает 25... 30 °С, то наблюдается переход двухкальциевого гидроалюмината в кубический трехкальциевый гидроалюминат ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), который сопровождается возникновением внутренних напряжений в цементном камне и понижением прочности бетона почти в два раза.

Марки глиноземистого цемента, определяемые по результатам испытания образцов трехсуточного возраста: М400, М500 и М600. Как известно, портландцемент приобретает такую прочность только через 28 сут нормального твердения. При быстром твердении глиноземистый цемент обладает нормальными сроками схватывания, почти такими же, как и портландцемент. Начало схватывания глиноземистого цемента должно наступать не ранее 30 мин (у портландцемента — не ранее 45 мин), а конец — не позднее 12 ч с начала затворения.

Тепловыделение глиноземистого цемента при твердении примерно в 1,5 раза больше, чем у портландцемента.

### 1.1.3. Расширяющиеся и безусадочные цементы

Расширяющиеся цементы относятся к числу смешанных, иногда многокомпонентных, цементов. Изучались различные расширяющиеся компоненты, однако наиболее эффективным оказался трехсульфатный гидросульфалоюминат кальция  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ . Состав цемента дает возможность регулировать количество и скорость образования кристаллов гидросульфалоюмината кальция и избежать появления вредных напряжений, вызывающих растрескивание затвердевшего цементного камня.

Водонепроницаемый расширяющийся цемент (ВРЦ) является быстросхватывающимся и быстротвердеющим гидравлическим вяжущим. Он получается путем тщательного смешивания глиноземистого цемента (около 70 %), гипса (около 20 %) и молотого специально изготовленного высокоосновного гидроалюмината кальция (около 10 %).

Гипсоглиноземистый расширяющийся цемент — быстротвердеющее гидравлическое вяжущее, получаемое совместным тонким измельчением высокоглиноземистых клинкера или шлака и природного двуводного гипса или тщательным смешиванием тех же материалов, измельченных раздельно. Гипсоглиноземистый цемент обладает свойством расширения при твердении в воде; при твердении на воздухе он проявляет безусадочные свойства.

Расширяющийся портландцемент (РПЦ) является гидравлическим вяжущим веществом, получаемым совместным тонким измельчением следующих компонентов (в процентах по массе): портландцементного клинкера — 58...63; глиноземистого шлака или клинкера — 5...7; гипса — 7...10; доменного гранулированного шлака или другой активной минеральной добавки — 23...28. РПЦ отличается быстрым твердением в условиях кратковременного пропаривания, высокой плотностью и водонепроницаемостью цементного камня и способностью расширяться в водных условиях и на воздухе при постоянном увлажнении в течение первых 3 сут.

Напрягающий цемент, затворенный водой, сначала твердеет и набирает прочность, затем расширяется как твердое тело и напрягает железобетон. Самонапряженный железобетон применен в напорных трубах, в монолитных и сборных резервуарах для воды, для цементно-бетонных покрытий аэродромов, в спортивных и подземных сооружениях.

#### **1.1.4. Особенности определения стандартных характеристик цемента**

В разных странах применяют различные методы определения основных физико-механических свойств цементов: прочности, водопотребности, сроков схватывания, равномерности измерения объема, которые дают различные результаты при испытаниях одних и тех же цементов. В настоящее время Европейским комитетом по стандартизации приняты европейские стандарты серии EN 196, регламентирующие едины для стран ЕС методы испытаний физико-механических свойств цементов в пластичных растворах с использованием полифракционного песка и специального оборудования. В странах СНГ вся нормативная база строительства основана на характеристиках цемента, получаемых при испытании образцов, изготовленных из более жестких растворов с использованием монофракционного песка.

В настоящее время в нашей стране принят межгосударственный стандарт ГОСТ 30744 — 2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка», ГОСТ 30515 — 97 «Цементы. Общие технические условия», ГОСТ 31108 — 2003 «Цементы общестроительные. Технические условия».

Далее приведены основные отличия этих стандартов. Началом схватывания считают время, прошедшее от начала затворения до того момента, когда игла не доходит до пластинки на 3...5 мм. Равномерность изменения объема цемента характеризуют величиной расширения образца из цементного теста нормальной густоты в кольце Ле Шателье при кипячении. Активность цементов определяют на стандартных образцах размером 4 × 4 × 16 см, изготовленных из цементно-

песчаной растворной смеси состава 1 : 3 (по массе), с использованием стандартного полифракционного песка с фиксированным значением В/Ц, равным 0,5. Уплотнение растворной смеси производят на встряхивающем столе.

В соответствии с ГОСТ 31108 — 2003 по прочности на сжатие в возрасте 28 сут цементы подразделяются на классы: 22,5; 32,5; 42,5; 52,5. По прочности на сжатие в возрасте 2 (7) сут (скорости твердения) каждый класс цементов, кроме класса 22,5, подразделяется на два подкласса: Н (нормально твердеющий) и Б (быстро твердеющий). Требования к физико-химическим свойствам цементов приведены в табл. 1.1.

Примеры условных обозначений:

1. Портландцемент класса 42,5 быстротвердеющий: **портландцемент ЦЕМ I 42,5Б ГОСТ 31108 — 2003.**

2. Портландцемент с шлаком (Ш) от 21 до 35 %, класса по прочности 32,5, нормальнотвердеющий: **портландцемент ЦЕМ II/В-Ш 32,5Н ГОСТ 31108 — 2003.**

3. Портландцемент с известняком (И) от 6 до 20 %, класса по прочности 32,5, нормальнотвердеющий: **портландцемент ЦЕМ II/А-И 32,5Н ГОСТ 31108 — 2003.**

4. Композиционный портландцемент с суммарным содержанием доменного гранулированного шлака (Ш), золы-уноса (З) и известняка (И) от 6 до 20 %, класса по прочности 32,5, быстротвердеющий: **композиционный портландцемент ЦЕМ II/А-К(Ш-З-И) 32,5Б ГОСТ 31108 — 2003.**

Таблица 1.1

### Требования к физико-химическим свойствам цементов

| Класс прочности цемента | Прочность на сжатие, МПа, в возрасте |                 |          |          | Начало схватывания, не ранее | РИО (расширение), мм, не более |
|-------------------------|--------------------------------------|-----------------|----------|----------|------------------------------|--------------------------------|
|                         | 2 сут, не менее                      | 7 сут, не менее | 28 сут   |          |                              |                                |
|                         |                                      |                 | не менее | не более |                              |                                |
| 22,5Н                   | —                                    | 11              | 22,5     | 42,5     | 75                           | 10                             |
| 32,5Н                   | —                                    | 16              | 32,5     | 52,5     |                              |                                |
| 32,5Б                   | 10                                   | —               |          |          |                              |                                |
| 42,5Н                   | 10                                   | —               | 42,5     | 62,5     | 60                           |                                |
| 42,5Б                   | 20                                   | —               |          |          |                              |                                |
| 52,5Н                   | 20                                   | —               | 52,5     | —        | 45                           |                                |
| 53,5Б                   | 30                                   | —               |          |          |                              |                                |

5. Шлакопортландцемент с содержанием доменного гранулированного шлака от 36 до 65 %, класса по прочности 32,5, нормально-твердеющий: **шлакопортландцемент ЦЕМ III/A 32,5Н ГОСТ 31108 — 2003.**

6. Пуццолановый цемент с суммарным содержанием пуццоланы (П), золы-уноса (З) и микрокремнезема (МК) от 21 до 35 %, класса по прочности 32,5, нормально-твердеющий: **пуццолановый цемент ЦЕМ IV/A (П-З-МК) 32,5Н ГОСТ 31108 — 2003.**

7. Композиционный цемент с содержанием доменного гранулированного шлака (Ш) от 11 до 30 % и золы-уноса (З) от 11 до 30 %, класса по прочности 32,5, нормально-твердеющий: **ЦЕМ V/A (Ш-З) 32,5Н ГОСТ 31108 — 2003.**

К группе воздушных вяжущих веществ относятся воздушная известь, гипсовые и магнезиальные вяжущие вещества.

**Известь.** Известь получают обжигом кальциево-магневых карбонатных горных пород при температуре 1 000... 1 200 °С. Содержание примесей в виде глин, кварцевого песка не должно превышать 6 %, а карбоната магния — 7 %. В воздушной извести модуль основности более 9, содержание свободных оксидов кальция и магния достигает 90... 95 %, а силикатов и алюминатов кальция не превышает 10 %. Обожженная известь представляет собой комья, которые необходимо подвергнуть гашению или помолу до удельной поверхности 350... 500 м<sup>2</sup>/кг. При гашении выделяется большое количество теплоты и увеличивается объем в 2—3,5 раза.

В зависимости от суммарного содержания оксида кальция и магния известь подразделяется на три сорта в зависимости от содержания оксидов и непогасившихся зерен: 1-й сорт — с содержанием оксидов не менее 90 % и непогасившихся зерен не более 7 %; 2-й сорт — соответственно не менее 80 % и не более 11 %; 3-й сорт — соответственно не менее 70 % и не более 14 %. Известь, предназначенная для производства автоклавных изделий, не должна содержать более 5 % оксида магния.

По скорости гашения различают известь быстрогасящуюся со скоростью гашения не более 8 мин; среднегасящуюся — со скоростью гашения не более 25 мин; медленногасящуюся — со скоростью гашения более 25 мин.

На воздухе гашеная известь с песком и другими заполнителями постепенно отвердевает под влиянием двух одновременно протекающих процессов:

- высыхания раствора, сближения кристаллов Ca(OH)<sub>2</sub> и их срастания;
- карбонизации извести под действием углекислого газа, который в небольших количествах содержится в воздухе.

Образующийся CaCO<sub>3</sub> срастается с кристаллами Ca(OH)<sub>2</sub> и упрочняет известковый раствор. Так, известковые растворы через 28 сут воздушного твердения имеют прочность при сжатии: на гашеной извести — 0,4... 1,0 МПа; на молотой негашеной извести — до 5 МПа.

**Строительный гипс.** Строительный гипс получают путем обжига природной гипсовой породы. При температуре обжига 140... 170 °С получают β-модификацию полугидрата сульфата кальция, а при обработке в автоклаве при температуре 105... 110 °С получают высокопрочный гипс α-модификации.

В зависимости от предела прочности на сжатие различают следующие марки гипсовых вяжущих: Г-2, Г-3, Г-4, Г-5, Г-6, Г-7, Г-10, Г-13, Г-16, Г-19, Г-22, Г-25.

Минимальный предел прочности каждой марки вяжущего должен соответствовать значениям, приведенным в табл. 1.2.

В зависимости от сроков схватывания и степени помола гипсовые вяжущие подразделяются на виды, приведенные соответственно в табл. 1.3, 1.4.

Строительный гипс обладает низкой водостойкостью. Для повышения водостойкости гипсовых вяжущих предложены гипсоцементно-пуццолановые вяжущие, которые получают путем смешивания в массовых процентах полуводного гипса (50... 70 %), портландцемен-

Таблица 1.2

**Минимальный предел прочности каждой марки гипсового вяжущего**

| Марка вяжущего | Предел прочности образцов-балочек размерами 40 × 40 × 160 мм в возрасте 2 ч, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ), не менее |            |
|----------------|---|------------|
|                | при сжатии  | при изгибе |
| Г-2            | 2,0 (20)  | 1,2 (12)   |
| Г-3            | 3,0 (30)  | 1,8 (18)   |
| Г-4            | 4,0 (40)  | 2,0 (20)   |
| Г-5            | 5,0 (50)  | 2,5 (25)   |
| Г-6            | 6,0 (60)  | 3,0 (30)   |
| Г-7            | 7,0 (70)  | 3,5 (35)   |
| Г-10           | 10,0 (100)  | 4,5 (45)   |
| Г-13           | 13,0 (130)  | 5,5 (55)   |
| Г-16           | 16,0 (160)  | 6,0 (60)   |
| Г-19           | 19,0 (190)  | 6,5 (65)   |
| Г-22           | 22,0 (220)  | 7,6 (70)   |
| Г-25           | 25,0 (250)  | 8,0 (80)   |

**Виды гипсовых вяжущих в зависимости от сроков схватывания**

| Вид вяжущего         | Индекс сроков твердения | Сроки схватывания, мин |                   |
|----------------------|-------------------------|------------------------|-------------------|
|                      |                         | Начало, не ранее       | Конец, не позднее |
| Быстро твердеющий    | А                       | 2                      | 15                |
| Нормально твердеющий | Б                       | 6                      | 30                |
| Медленно твердеющий  | В                       | 20                     | Не нормируется    |

та (10... 25 %) и активной минеральной добавки в виде трепела, диатомита (10... 25 %).

Представителем водостойкого гипсового вяжущего является композиционное гипсовое вяжущее, содержащее добавки в виде портландцемента, активного минерального компонента, суперпластификатора, микрокремнезема, получаемое с использованием метода механохимической активации и отличающееся повышенной прочностью.

**Магнезиальные вяжущие вещества.** Сырьем для получения магнезиальных вяжущих веществ является горная порода магнезит, состоящая преимущественно из углекислой соли магния в кристаллическом или аморфном состоянии.

В результате обжига при температуре 700... 800 °С получают порошок — каустический магнезит, состоящий в основном из оксида магния. Каустический магнезит затворяют растворами хлористого или серноокислого магния; иногда для затворения применяют хлористый цинк, серноокислое железо и т. п.

При использовании сырья в виде доломита, представляющего собой двойную углекислую соль магния и кальция, изготавливают каустический доломит.

Таблица 1.4

**Виды гипсовых вяжущих в зависимости от степени помола**

| Вид вяжущего    | Индекс степени помола | Максимальный остаток на сите с размерами ячеек в свету 0,2 мм, %, не более |
|-----------------|-----------------------|--|
| Грубого помола  | I                     | 23   |
| Среднего помола | II                    | 14   |
| Тонкого помола  | III                   | 2  |

Магнезиальные вяжущие отличаются высокой плотностью — 2,8... 3,4 г/см<sup>3</sup>; их средняя насыпная плотность составляет 0,8... 1,1 г/см<sup>3</sup>; они относятся к быстротвердеющим вяжущим — прочность магнезиальных вяжущих в растворе может достигать 80... 100 МПа.

Магнезиальные вяжущие в строительстве применяют для устройства теплых бесшовных (кислолитовы) полов, основным заполнителем которых служат древесные опилки, а также для изготовления фибролита, теплоизоляционных материалов и т. п.

### 1.1.5. Кислотоупорный цемент

Кислотоупорный цемент состоит из тщательно перемешенного молотого кварцевого песка и кремнефтористого натрия; его затворяют на жидком стекле, которое представляет собой коллоидный раствор натриевого или калиевого силиката ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ) с плотностью 1,32... 1,50 г/см<sup>3</sup>. Кислотоупорный цемент применяют для изготовления кислотостойких и жаростойких бетонов.

Жидкое стекло может затвердевать только на воздухе; при этом испаряется жидкая фаза, повышается концентрация свободного коллоидного кремнезема, происходят его коагуляция и уплотнение. Кремнефтористый натрий является катализатором твердения, повышающим водостойкость и кислотостойкость затвердевшего бетона.

### 1.1.6. Мелкий заполнитель

В качестве мелкого заполнителя в тяжелом бетоне применяют песок, состоящий из зерен размером 0,14... 5,00 мм и имеющий плотность более 1,8 г/см<sup>3</sup>. Для приготовления тяжелых бетонов применяют природные пески, образовавшиеся в результате естественного разрушения горных пород, а также искусственные пески, полученные путем дробления твердых горных пород и из отсевов. Природные пески представляют собой рыхлую смесь зерен различных минералов, входивших в состав изверженных (реже осадочных) горных пород (кварца, полевого шпата, кальцита, слюды и др.).

Качество песка, применяемого для изготовления бетона, определяется минеральным составом, зерновым составом и содержанием вредных примесей.

Заполнитель должен состоять из зерен разного размера (разных фракций); при этом количество крупных, средних и мелких зерен (т. е. зерновой состав заполнителя) устанавливается на основе проверенных рекомендаций таким образом, чтобы зерна меньшего размера располагались в пустотах между крупными зёрнами. Чем компактнее расположены зерна заполнителей, тем меньше объем пустот.

Зерновой состав песка определяют просеиванием высушенной средней пробы (1 000 г) через стандартный набор сит с размерами отверстий 2,5 мм и с сетками, имеющими квадратные ячейки с размером сторон 1,25; 0,63; 0,315; 0,14 мм. Мелкие частицы песка (пыль) имеют размер менее 0,14 мм. Сначала вычисляют частный остаток, %, на каждом сите  $a_i$  как отношение массы остатка  $m_i$  к массе просеиваемой пробы  $m$ :

$$a_i = 100m_i/m.$$

Затем определяют полный остаток  $A_i$ , %, на каждом сите как сумму частных остатков на данном сите и на всех ситах крупнее данного:

$$A_i = a_{2,5} + \dots + a_i.$$

Зерновой состав песка удобно представить графически, если по горизонтали отложить размеры отверстий сит, а по вертикали — полные остатки на ситах. На рис. 1.1 заштрихованная область — это допустимые пределы колебаний зернового состава песков для бетона.

Для оценки крупности песка применяют безразмерный показатель — модуль крупности  $M_k$ , который вычисляют как отношение суммы полных остатков на ситах, начиная с сита с размерами отверстий 2,5 мм и кончая ситом 0,14, ко всей пробе, принятой за 100:

$$M_k = (A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,14})/100.$$

В зависимости от зернового состава песок подразделяется на крупный, средний, мелкий и очень мелкий (табл. 1.5). Для бетона рекомендуется применять крупный, средний и мелкий песок. Для строительных растворов применяют и очень мелкий песок. Если песок не удовлетворяет по зерновому составу требованиям стандар-

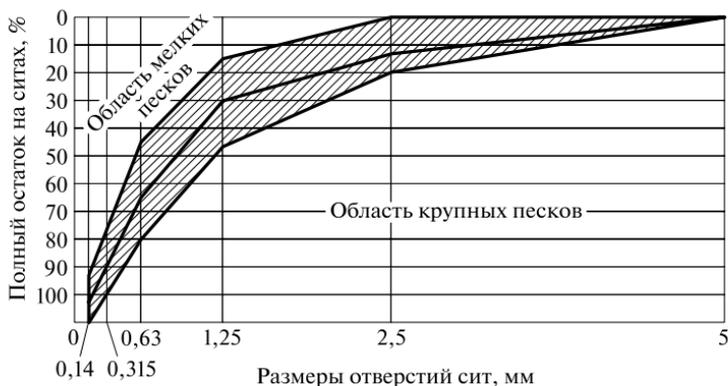


Рис. 1.1. График зернового состава песка

## Классификация песков по крупности

| Группа песка | Полный остаток на сите 0,63, % по массе | Модуль крупности $M_k$ |
|--------------|---|------------------------|
| Крупный      | Более 45                                | Более 2,5              |
| Средний      | 30...45                                 | 2,5... 2,0             |
| Мелкий       | 10... 30                                | 2,0... 1,5             |
| Очень мелкий | Менее 10                                | 1,5... 1,0             |

та, то его необходимо фракционировать, т.е. рассеивать на две фракции (крупную и мелкую), получаемые разделением исходного песка по граничному зерну, соответствующему размеру отверстий сит 1,25 или 0,63 мм, а затем смешивать эти фракции.

Мелкие частицы (пыль, ил, глина) увеличивают водопотребность бетонных смесей и расход цемента в бетоне. Поэтому содержание в песке зерен, проходящих через сито 0,14, должно быть не более 10 % по массе; при этом количество пылевидных, илистых и глинистых частиц, определяемых отмучиванием, не должно превышать 3 % в природном песке и 4 % в дробленном песке (глины — не более 0,1... 0,5 %).

Глина набухает при увлажнении и увеличивается в объеме при замерзании, при этом снижается морозостойкость. Поэтому содержание глины в песке строго ограничивается, тем более не допускается наличие комков глины и суглинка.

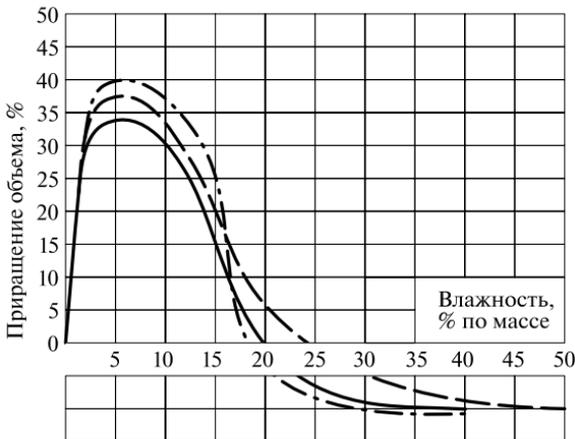


Рис. 1.2. График изменения объема песка при увлажнении (кривые относятся к пескам различного зернового состава)

Песок очищают от мелких частиц путем промывки. В природном песке и гравии могут содержаться органические примеси (например, продукты разложения остатков растений), в частности органические гумусовые кислоты, которые понижают прочность бетона и даже разрушают цемент. Наличие органических примесей определяют колориметрическим (цветовым) методом. Песок считается пригодным для бетона, если жидкость — 3%-ный раствор NaOH над песком — не окрашивается или приобретает окраску светлее эталона (эталон имеет светло-желтый цвет).

В природном песке и гравии могут содержаться и неорганические примеси, которые тоже вызывают химическую коррозию цементного камня. К этой группе примесей относятся сернокислые и сернистые соединения.

Песок отличается от крупного заполнителя способностью сильно изменять насыпную плотность и объем при изменении влажности (рис. 1.2) от 0 до 25 %. Сухой песок занимает наименьший объем, а влажный песок при укладке сбивается в комки и не укладывается так плотно, как сухой. Наибольший объем занимает песок при влажности 5...7 %.

### **1.1.7. Крупный заполнитель**

В качестве крупного заполнителя для бетона применяют гравий, щебень и щебень из гравия с размером зерен 5...70 мм. При бетонировании массивных конструкций можно применять щебень крупностью до 150 мм.

Зерна гравия имеют скатанную форму и гладкую поверхность. Обычно гравий содержит в том или ином количестве песок, а также вредные примеси: глину, пыль, слюду, гумусовые вещества (органические примеси).

Щебень получают дроблением изверженных, метаморфических, плотных и водостойких осадочных горных пород (плотных известняков, песчаников и др.). Зерна щебня имеют угловатую форму (желательно, чтобы по форме они приближались к кубу). Более шероховатая, чем у гравия, поверхность зерен способствует лучшему их сцеплению с цементным камнем, поэтому для бетона высокой прочности (М500 и выше) обычно применяют щебень, а не гравий.

Качество крупного заполнителя определяется минеральным составом и свойствами исходной породы (ее прочностью и морозостойкостью), зерновым составом заполнителя, формой зерен и содержанием вредных примесей. Прочность исходной породы при сжатии в насыщенном водой состоянии должна не менее чем в 1,5—2 раза превышать марку бетона.

В районах с развитой металлургической промышленностью экономически выгодно применять щебень, полученный в результате

дробления и рассева тяжелых отвальных или специально отлитых доменных и мартеновских шлаков. Щебень из шлака должен иметь устойчивую структуру. Распад шлака может вызываться гашением зерен свободной извести. Щебень из шлака должен удовлетворять общим требованиям в отношении зернового состава. Не допускаются в нем посторонние примеси топливных шлаков и зол, колошниковой пыли и т. д.

Применяют метод прямого определения прочности крупного заполнителя путем раздавливания его в цилиндре. Показатель дробимости  $D_p$ , %, вычисляют с погрешностью до 1 % по формуле

$$D_p = 100(m_1 - m_2)/m_1,$$

где  $m_1$  — испытываемая проба щебня (гравия), кг;  $m_2$  — остаток на контрольном сите после просеивания раздробленной в цилиндре пробы щебня (гравия), кг.

В зависимости от дробимости при сжатии в цилиндре щебень подразделяется на следующие марки по прочности: М1400, М1200, М1000, М800, М600, М400, М300 и М200. Щебень марок М1400 и М1200 может содержать зерна слабых пород в количестве не более 5 %; щебень марок М1000, М800, М600, М400 — не более 10 %; щебень М300 и М200 — не более 15 % (по массе). Содержание в гравии и щебне из гравия зерен слабых пород не должно превышать 10 % по массе.

Морозостойкость щебня и гравия должна обеспечивать получение проектной марки бетона по морозостойкости. Установлены следующие марки щебня и гравия по морозостойкости: F15, F25, F50, F100, F150, F200 и F300. Марка обозначает число циклов попеременного замораживания и оттаивания, при котором потеря в массе пробы крупного заполнителя не превышает 5 % (для марок 15, 25 и 50 циклов допускается потеря массы до 10 %).

Относительный объем пустот (пустотность) крупного заполнителя  $V_{\text{пуст}}$  определяют с точностью до 0,1 % по формуле

$$V_{\text{пуст}} = 1 - \rho_n/\rho,$$

где  $\rho_n$  — насыпная плотность крупного заполнителя;  $\rho$  — плотность крупного заполнителя в куске.

Для уменьшения пустотности необходимо увеличение объемной насыпной массы путем правильного подбора зернового состава.

Зерновой состав крупного заполнителя устанавливают с учетом наибольшего  $D_{\text{max}}$  и наименьшего  $D_{\text{min}}$  размеров зерен щебня или гравия. Наибольший размер зерен при бетонировании железобетонных балок, колонн, рам должен быть не более 3/4 наименьшего расстояния между стержнями арматуры, а для плит перекрытий и покрытий — не более 1/2 толщины плиты.

Наименьшая крупность соответствует размеру отверстия самого мелкого из сит, через которое проходит не более 5 % просеиваемой пробы; обычно наименьшая крупность равна 5 (3) мм.