

А. М. НЕВИЛЛЬ

# СВОЙСТВА БЕТОНА

---

*Сокращенный перевод с английского  
канд. техн. наук В. Д. ПАРФЕНОВА  
и Т. Ю. ЯКУБ*



ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ

МОСКВА — 1972

Properties of  
concrete

A. M. Neville  
M. C., M. Sc. (Eng.), Ph. D., M. I.C. E.  
A. M. I. Struct. E., M. A. S. C. E.  
Professor of Civil Engineering  
Dean of Engineering and  
Dean of Graduate Studies  
University of Alberta at Calgary

London  
Sir Isaac Pitman & Sons LTD

В книге обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований свойств бетона. Рассматриваются свойства различных портландцементов, заполнителей для бетона и их роль в получении высококачественного бетона. Большое внимание уделяется рассмотрению процессов приготовления, удобообрабатываемости, транспортирования бетонной смеси, упруго-пластических свойств, долговечности бетона и способов ее повышения. Описаны способы определения прочности бетона без разрушения образцов. Приводится список британских и американских стандартов на цементы, заполнители и бетон.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников предприятий по производству бетона и железобетона, научно-исследовательских и строительных организаций.  
Табл. 62, рис. 228.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Исследованию свойств бетона ежегодно посвящается значительное число работ. Этот сложный материал, свойства которого зависят не только от составляющих материалов, но и от технологии изготовления, в современном строительстве занимает первое место. Появляются все новые разновидности специальных бетонов. Бетон давно уже стал не только конструкционным материалом, но широко применяется для тепло- и гидроизоляции, получения жаростойких, декоративных, радиационностойких конструкций. При этом важно, что бетонные и железобетонные конструкции специального назначения могут одновременно воспринимать большие силовые нагрузки.

Периодическое обобщение накопленных сведений о свойствах бетона представляется важным условием успешного технического прогресса в строительстве.

Перевод книги А. М. Невилля в этом плане является необходимым шагом, направленным на более полное использование результатов научных исследований и практики строительства.

В монографии «Свойства бетона» рассмотрены основные свойства бетонов, главным образом тяжелого бетона на портландцементе. Объективное изложение результатов исследований, их сопоставление между собой, дополненное высказываниями автора книги, позволяют оценить степень надежности приводимых сведений. Дело в том, что в технологии бетона сопоставление данных, полученных различными исследователями, чрезвычайно затруднено различиями в свойствах исходных цементов и заполнителей, примененных в исследованиях для получения бетонов с заданными прочностными свойствами, и отличиями в деталях методики испытаний. Полностью преодолеть эту трудность А. М. Невиллю не удалось, хотя им и много сделано для достижения этой цели. В частности, большой интерес представляют результаты исследований влияния методики испытаний на количественные значения характеристик свойств бетона, содержащиеся в главе 8.

Книга Невилля интересна для широкого круга читателей. Подытоживая сведения о различных свойствах бетона, автор дает систематизированное описание основных свойств. Известно, что свойства бетона в значительной степени определяются технологией его изготовления — они неразрывно связаны с характеристиками оборудования для приготовления и уплотнения бетонной смеси, температурными и влажностными условиями твердения бетона, зависят от малых количеств добавок, вводимых при затворении бетона, и других параметров технологии. Поэтому необходимо дать, с одной стороны, наиболее общие воспроизводимые количественные характеристики бетона, а с другой — учесть возможные изменения этих характеристик под влиянием технологии, исключив в то же время случайные данные и случайно влияющие факторы. Автор книги справился с этими задачами, что и позволяет рекомендовать его труд советскому читателю, несмотря на то, что содержание монографии несколько ограничено, так как она основывается

преимущественно на работах английских и американских авторов. Недостаточно использованы работы, выполненные в других странах, и совсем, практически, нет данных, основанных на работах советских исследователей.

В СССР ведутся обширные исследования свойств бетонов различного вида, получены новые и интересные результаты, которые оказали влияние и на развитие науки о бетоне во всем мире.

Создаваемая в настоящее время наука — «бетоноведение» — включает в качестве исходного раздел о свойствах бетона. Книга Невилля может быть использована при создании этого раздела как обобщающая сводка, содержащая критический анализ экспериментальных данных в этой области.

Основанная на большом фактическом материале книга Невилля дает возможность не только использовать приведенные в ней данные. Автор не делает в некоторых случаях категорических выводов, предоставляя это читателю, ограничиваясь лишь констатацией фактов и выводами в предположительной форме, — это позволяет читателю судить о необходимости и направлении дальнейших исследований.

Книга не лишена недостатков. В основном ее содержание посвящено тяжелому бетону на портландцементе. Легкие бетоны, специальные бетоны на других вяжущих и заполнителях описываются значительно менее полно.

Менее интересна для советского читателя глава 10 «Проектирование состава бетона», в которой излагается принятая в Англии методика, не отличающаяся особыми преимуществами. При переводе книги эта глава, а также разделы, касающиеся методов испытаний, подверглись сокращению. Исключена в целях сокращения объема книги также библиография.

В примечаниях редактора сделана попытка, хотя бы частично, упомянуть основные исследования советских авторов по вопросам, которые излагаются в книге. Эта попытка, несомненно, не может быть полной и имеет целью показать принципиально большую роль советских исследований в изучении наиболее сложных вопросов бетоноведения.

Соответственно приведенный список литературы ни в коей мере не охватывает работ советских ученых, а лишь иллюстрирует их участие в разработке тех или иных проблем.

При переводе и редактировании книги возникли неизбежные трудности в связи с переводом английских мер в метрические. В большинстве случаев приведены точные значения, хотя это и вызывает неудобства при чтении тех мест, где в английском тексте были приведены целые числа или округленные значения. Расхождения в терминологии отражены в примечаниях.

Можно надеяться, что книга Невилля поможет инженерам и исследователям в области технологии бетона лучше познать этот сложный материал и правильно оценить то, что сделано и что еще предстоит сделать для его лучшего использования в конструкциях, отвечающих все возрастающим требованиям современного строительства.

Цементом, в самом общем смысле этого слова, может быть назван материал с адгезионными и когезионными свойствами, которые делают его способным соединять отдельные минеральные частицы в монолитное целое. Такое определение охватывает большое число различных вяжущих веществ.

Для строительства значение термина «цемент» ограничено вяжущими веществами, применяемыми для скрепления каменных материалов, песка, кирпича, строительных блоков и т. д.

Для бетонов применяют гидравлические вяжущие вещества, обладающие способностью схватываться и твердеть под водой в результате химического взаимодействия с ней.

Гидравлические вяжущие состоят в основном из силикатов и алюминатов кальция, к ним относятся романцементы, портландцементы, глиноземистые цементы и др. В настоящей главе рассматриваются вопросы производства портландцемента, а также его структура и свойства в негидратированном и гидратированном состоянии.

Разновидности портландцемента и специальные цементы рассмотрены в главе 2.

### **ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА**

---

Применение вяжущих веществ имеет давнюю историю. Древние египтяне использовали обожженный природный гипсовый камень. Греки и римляне начали с применения обожженного известняка, позже научились к извести и воде добавлять песок, дробленый камень или кирпич и битые черепки. Это был первый в истории человечества бетон.

Известковый раствор не твердеет под водой, поэтому для подводных сооружений римляне применяли совместно размельченные известь и вулканический пепел или обожженные глиняные черепки. Использование активных кремнезема и глинозема, входящих в состав вулканического пепла и глины, позволяло получить вяжущее, впоследствии названное «пуццолановым цементом».

В ряде древних римских сооружений, таких как Римский коллизей или мост Гард вблизи Ним, цементный раствор, на котором была сложена каменная кладка, сохранил до наших дней высокую прочность.

После застоя в применении цемента в средние века лишь в XVIII в. может быть отмечен некоторый прогресс. В 1756 г. Джон Смитон при перестройке Эддистонского маяка, расположенного у побережья Корн, открыл, что отличный раствор можно получить путем перемешивания пуццоланового компонента с известью, полученной из известняка с высоким содержанием глины.

Смитон был первым, кто оценил химическую активность гидравлической извести. Затем Джозефом Паркером был получен романцемент путем обжига глинистого известняка. В 1824 г. Джозеф Аспдин, строитель из Лидса, взял патент на портландцемент<sup>1</sup>. Цемент был получен обжигом тонкоизмельченной смеси глины и известняка до удаления углекислого газа. Однако температура обжига была гораздо ниже температуры спекания, необходимой для изготовления современного портландцемента.

Прототип современного портландцемента был приготовлен в 1845 г. Исааком Джонсоном, обжигавшим смесь глины и мела до спекания, при котором происходили реакции клинкерообразования.

Название «портландцемент» первоначально было дано вследствие сходства цвета и качества затвердевшего цемента с портландским камнем — известняком, добываемом в Дорсете. Это название сохранилось до настоящего времени. Портландцементами называют вяжущие вещества, получаемые из тщательно перемешанной сырьевой смеси, состоящей из известняка и глинистых или других материалов, содержащих кремнезем, глинозем и окислы железа. Обжиг сырьевой смеси проводят при температуре спекания. Получаемый клинкер размалывают. По действующему Британскому стандарту (BS 12:1958) недопустимо добавление других материалов, кроме гипса и воды.

### ПРОИЗВОДСТВО ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Сырьевыми материалами для получения портландцемента являются главным образом карбонатные горные породы, такие как известняк или мел, а также глинозем и кремнезем в виде глины или глинистого сланца. Возможно использование мергелей, состоящих из природной смеси карбонатных и глинистых пород.

Процесс производства цемента состоит из измельчения сырьевых материалов, тщательного их перемешивания в требуемом соотношении и обжига в больших вращающихся печах. При температурах около 1300—1400°С происходит спекание и частичное оплавление сырьевой смеси. Продукт, получаемый при этом, называют цементным клинке-

<sup>1</sup> История развития производства цемента должна быть дополнена сведениями о достижениях русских инженеров. Егор Челиев опубликовал в 1825 г. в Москве книжку под названием: «Полное наставление, как приготовить дешевый и лучший меритель, или цемент, весьма прочный для подводных строений, как-то: каналов, мостов, бассейнов, плотин, подвалов, погребов и штукатурки каменных и деревянных строений». Изучение содержания книги показывает, что Челиеву принадлежит приоритет изобретения способа производства цемента из искусственных смесей извести (или известняка) с глиной. Подробнее об этой интересной работе см. [1, 2, 3]. (Прим. ред.).

ром. Клинкер охлаждают и тонко измельчают совместно с небольшой добавкой гипса, в результате получают портландцемент<sup>1</sup>.

Подробное описание процесса производства портландцемента имеется в руководствах по технологии вяжущих веществ.

### **ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА**

Сырьевые материалы, используемые для производства портландцемента, состоят в основном из окиси кальция, кремнезема, глинозема и окиси железа. В печи эти окислы химически взаимодействуют друг с другом с образованием ряда более сложных соединений, при этом достигается химическое равновесие. Обычно остается лишь небольшое количество химически не связанной окиси кальция. Однако во время охлаждения клинкера равновесие не сохраняется и в зависимости от скорости охлаждения изменяется степень кристаллизации минералов клинкера и количество аморфного вещества. Вещества одного и того же химического состава в аморфном, стеклообразном и кристаллическом состоянии значительно различаются по своим свойствам. Взаимодействие жидкой фазы клинкера с вновь образованными кристаллическими соединениями усложняет структуру клинкера.

Тем не менее цемент можно рассматривать как систему, находящуюся в равновесии, вследствие «замораживания» расплава в состоянии, существовавшем при температуре клинкерообразования. В действительности это предположение делается на основе расчета состава товарных цементов; расчетный состав определяется по известному содержанию окислов в клинкере исходя из предположения о полной кристаллизации соединений в состоянии равновесия.

В качестве основных компонентов цементного клинкера обычно рассматриваются четыре минерала (табл. 1.1).

*Таблица 1.1. Основные минералы, составляющие цементный клинкер*

Клинкерный минерал	Состав	Сокращенное обозначение
Трехкальциевый силикат . . . . .	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Двухкальциевый » . . . . .	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Трехкальциевый алюминат . . . . .	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Четырехкальциевый алюмоферрит . . . . .	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

В действительности силикаты в цементе не являются чистыми фазами, так как содержат небольшое количество окислов в виде твердых растворов. Эти окислы оказывают значительное влияние на расположение атомов, форму кристаллов и гидравлические свойства силикатов.

<sup>1</sup> По ГОСТ 10178—62 допускается введение в состав цемента, при измельчении клинкера, активных минеральных добавок до 15%. (Прим. ред.)

Определение расчетного состава портландцемента основано на работе Р. Г. Богга (R. H. Bogge) и других исследователей. Существуют также и иные методы расчета состава<sup>1</sup>.

Уравнения Богга для определения процентного содержания основных клинкерных минералов приводятся ниже. В скобках химические формулы обозначают содержание данного окисла в процентах от веса цемента.

$$C_3S = 4,07 (CaO) - 7,6 (SiO_2) - 6,72 (Al_2O_3) - 1,43 (Fe_2O_3) - 2,85 (SO_3);$$

$$C_2S = 2,87 (SiO_2) - 0,754 (3CaO \cdot SiO_2);$$

$$C_3A = 2,65 (Al_2O_3) - 1,69 (Fe_2O_3);$$

$$C_4AF = 3,04 (Fe_2O_3).$$

Кроме основных минералов, указанных в табл. 1.1, в цементном клинкере содержатся в небольшом количестве MgO, TiO<sub>2</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O и Na<sub>2</sub>O. Они обычно составляют не более нескольких процентов от веса цемента. Особый интерес представляют окислы натрия и калия. В дальнейшем мы их называем щелочами. Установлено, что они химически взаимодействуют с некоторыми заполнителями и продукты этих реакций вызывают разрушение бетона (см. главу 7). Щелочи влияют на скорость роста прочности цемента. Содержание щелочей и Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> можно быстро определить с помощью спектрофотометра.

Минералогический состав цемента установлен в результате изучения фазового равновесия тройных систем C—A—S и C—A—F, четверной системы C—C<sub>2</sub>S—C<sub>5</sub>A<sub>3</sub>—C<sub>4</sub>AF и др. Были исследованы кривые плавления или кристаллизации и вычислены составы жидких и твердых фаз при любой температуре. Фактический состав клинкера в дополнение к методам химического анализа может быть исследован с помощью микроскопа путем измерения коэффициента преломления соединений в виде порошка. Содержание минералов-силикатов может быть определено с помощью микрометра Шэндс при исследовании прозрачных шлифов (аналогично применяемому в петрографическом анализе) в проходящем свете. Полированные и травленные шлифы также могут быть исследованы как в отраженном, так и в проходящем свете. Рентгеновская дифракция порошкообразного вещества может быть использована с целью обнаружения кристаллических фаз, а также для исследования их кристаллической структуры. Находит применение также электронный микроскоп, который дает большое увеличение и обладает значительно большей разрешающей способностью, чем световой<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Большие работы по исследованию состава цементного клинкера выполнены в СССР В. А. Киндом, которым предложены уточненные формулы расчета минерального состава портландцементного клинкера [5]. Условность метода расчета состава клинкера была показана Н. А. Тороповым [6]. Однако для практических целей расчет условного минералогического состава клинкера полезен. Методика расчета приведена в [7]. (Прим. ред.)

<sup>2</sup> Современные методы определения фазового состава цементного клинкера и некоторые результаты, полученные этими методами, изложены в монографиях [8, 9, 10]. (Прим. ред.)



$C_3S$ , содержание которого обычно наибольшее, встречается в виде небольших равноразмерных неокрашенных зерен. В процессе охлаждения при температурах ниже  $1250^\circ C$   $C_3S$  медленно распадается, но если охлаждение идет достаточно быстро,  $C_3S$  сохраняется без изменения и является сравнительно устойчивым при обычных температурах.

Известно, что  $C_2S$  имеет три или даже четыре модификации.  $\alpha$ - $C_2S$ , которая существует при высоких температурах, переходит при температуре  $1456^\circ C$  в  $\beta$ -модификацию.  $\beta$ - $C_2S$  претерпевает дальнейшее превращение в  $\gamma$ - $C_2S$  при  $675^\circ C$ , но при скорости охлаждения цементов, имеющей место в производственных условиях, в клинкере сохраняется  $\beta$ - $C_2S$  в виде зерен округлой формы, обычно показывающих двойникование кристаллов.

$C_3A$  образует прямоугольные кристаллы, но в застеклованном состоянии это аморфное промежуточное вещество.

$C_4AF$  представляет собой твердый раствор ряда соединений от  $C_2F$  до  $C_6A_2F$ ; принятая формула  $C_4AF$  является условной, отражающей средний состав этой фазы.

Различные типы цементов в значительной степени отличаются по своему химико-минералогическому составу, который обуславливается соотношением сырьевых материалов. Одно время в США была принята попытка контролировать свойства цементов различного назначения установлением предельных количеств четырех основных клинкерных минералов, определенных расчетом по химическому анализу. Этот способ исключил бы многочисленные физические испытания, но, к сожалению, расчетный минералогический состав не является достаточно точным и не учитывает все необходимые свойства цемента и, следовательно, не может заменить непосредственных определений требуемых свойств.

Примерный химический состав портландцемента в % следующий:  $CaO$ —60—67;  $SiO_2$ —17—25;  $Al_2O_3$ —3—8;  $Fe_2O_3$ —0,5—6;  $MgO$ —0,1—4; щелочей—0,4—1,3;  $SO_3$ —1—3.

В табл. 1.2 приводится химический и расчетный минералогический составы типичного портландцемента.

Нерастворимый остаток определяют путем обработки цемента соляной кислотой; он характеризует количество примесей в цементе, попадающих главным образом в составе гипсового камня. BS 12:1958 допускает величину нерастворимого остатка не более 1,5% веса цемента. Потеря в весе при прокаливании характеризует степень карбонизации и гидратации свободных окислов кальция и магния в результате атмосферных воздействий на цемент. Максимальная потеря при прокаливании (при  $1000^\circ C$ ), допускаемая BS 12:1958, составляет для цементов, используемых в условиях умеренного климата, 3% и для цементов, применяемых в тропических условиях, 4%. Так как гидратированная свободная известь безвредна, то для определенного содержания свободной извести в цементе повышенная потеря веса при прокаливании в действительности является полезной.

Важно отметить, что минералогический состав цемента может изменяться в значительной степени даже при сравнительно небольших

Таблица 1.2. Химический и минералогический состав типичного портландцемента [1.5]\*

Содержание окислов в %	Расчетный минералогический состав в %
CaO — 63	C <sub>3</sub> A—10,8
SiO <sub>2</sub> —20	C <sub>3</sub> S—54,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> —6	C <sub>2</sub> S—16,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> —3	C <sub>4</sub> AF—9,1
MgO — 1,5	
SO <sub>3</sub> —2	
K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O — 1	
Прочие компоненты — 1	
Потери при прокаливании — 2	
Нерастворимый остаток — 0,5	

\* В дальнейшем, там где это не оговорено, под цементом подразумевается портландцемент. (Прим. ред.)

колебаниях химического состава цемента. В табл. 1.3, по данным Чернина, в графе 1 приводится химический состав типичного быстротвердеющего цемента. Если содержание окиси кальция снижается на 3% при соответствующем увеличении содержания остальных окислов (графа 2), соотношение C<sub>3</sub>S : C<sub>2</sub>S значительно изменяется. Химический состав цемента, приведенный в графе 3, отличается по содержанию глинозема и окиси железа на 1,5% от состава цемента, указанного в графе 1, при этом содержание окислов кальция и кремния остается прежним. Тем не менее данное изменение существенно влияет на соотношение между силикатами C<sub>3</sub>S : C<sub>2</sub>S, а также на содержание C<sub>3</sub>A и C<sub>4</sub>AF.

Таблица 1.3. Влияние изменений химического состава цемента на его минералогический состав

Состав	Содержание составляющих цемента в %		
	1	2	3
Химический			
CaO . . . . .	66	63	66
SiO <sub>2</sub> . . . . .	20	22	20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	7	7,7	5,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	3	3,3	4,5
Прочие . . . . .	4	4	4
Минералогический			
C <sub>3</sub> S . . . . .	65	33	73
C <sub>2</sub> S . . . . .	8	38	2
C <sub>3</sub> A . . . . .	14	15	7
C <sub>4</sub> AF . . . . .	9	10	14

Несомненно, что контролю химического состава цемента придается особое значение. У типичных обычных и быстротвердеющих портландцементов общая сумма содержания двух силикатов меняется незначительно, в узких пределах, поэтому различия в составе в большой степени зависят от соотношения между  $\text{CaO}$  и  $\text{SiO}_2$  в сырьевых материалах.

### ГИДРАТАЦИЯ ЦЕМЕНТА

При затворении портландцемента водой происходят реакции, обуславливающие твердение цементного теста. В присутствии воды силикаты и алюминаты, перечисленные в табл. 1.1, образуют продукты гидратации, которые постепенно затвердевают и превращаются в цементный камень.

При взаимодействии составляющих цемента с водой идут два процесса. Прежде всего происходит непосредственное присоединение молекул воды, или истинная гидратация. Второй процесс характерен взаимодействием минералов цемента с водой с их разложением — гидролиз.

Обычно применяют термин «гидратация» ко всем типам реакций цемента с водой, т. е. как к истинной гидратации, так и к гидролизу.

Ле Шателье около 80 лет назад впервые установил, что при одинаковых условиях продукты гидратации цемента имеют тот же химический состав, что и продукты гидратации его отдельных составляющих. Позже это было подтверждено Стейнором, а также Боггом и Лерчем, хотя и с оговоркой, что продукты реакции могут воздействовать друг на друга или даже взаимодействовать друг с другом в системе. Силикаты кальция — основные составляющие цемента, поэтому физические свойства цемента во время гидратации определяются поведением каждого из этих составляющих в отдельности.

Продукты гидратации цемента характеризуются низкой растворимостью в воде, о чем свидетельствует высокая водостойкость цементного камня. Гидратированные новообразования цемента прочно связываются с непрореагировавшим цементом, однако механизм этой связи пока не ясен. Возможно, что гидратные новообразования создают оболочку, которая растет изнутри под воздействием воды, проникающей через эту оболочку. Или возможно, что растворенные силикаты проникают через оболочку и осаждаются на ней в виде внешнего слоя. И третья возможность: образование и осаждение коллоидного раствора во всей массе после того, как достигнуто насыщение, дальнейшая гидратация продолжается внутри этой структуры.

Каким бы ни был способ осаждения продуктов гидратации, скорость гидратации непрерывно уменьшается, так что даже после длительного времени остается заметное количество негидратированного цемента. Так, например, через 28 суток после затворения водой зерна цемента прогидратировали только на глубину 4  $\mu$ . Пауэрс подсчитал, что полная гидратация при нормальных условиях возможна только для цементных зерен размером менее 50  $\mu$ , но при непрерывном размельчении цемента в воде полная гидратация была получена в течение 5 суток.

Микроскопическое исследование гидратированного цемента не подтверждает прохождения воды в глубь зерен цемента и выборочной гидратации наиболее реакционно способных составляющих (например,  $C_3S$ ), которые могут находиться в центре зерна. Поэтому представляется, что гидратация развивается вследствие постепенного уменьшения размеров цементных зерен. Действительно, было обнаружено, что в возрасте нескольких месяцев негидратированные зерна цемента грубого помола содержат как  $C_3S$ , так и  $C_2S$  и, возможно, что мелкие частицы  $C_2S$  гидратируются раньше, чем завершается гидратация крупных частиц  $C_3S$ .

Различные составляющие цемента обычно присутствуют во всех его зернах, и исследования показали, что оставшиеся зерна цемента после определенного периода гидратации имеют тот же относительный минералогический состав, что и целое зерно до гидратации. В течение первых 24 ч может все же происходить избирательная гидратация.

Основными гидратами являются гидросиликаты кальция и трехкальциевый гидроалюминат. Полагают, что  $C_4AF$  гидратируется с образованием трехкальциевого гидроалюмината и аморфной фазы, возможно  $CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot aq$ . Возможно также, что некоторое количество  $Fe_2O_3$  присутствует в твердом растворе гидроалюмината кальция<sup>1</sup>.

Степень гидратации цемента может быть определена различными способами посредством измерения: количества  $Ca(OH)_2$  в тесте; теплоты выделения при гидратации; удельного веса теста; количества химически связанной воды; количества негидратированного цемента (с помощью рентгеноструктурного анализа), а также косвенного по прочности цементного камня.

### ГИДРОСИЛИКАТЫ КАЛЬЦИЯ

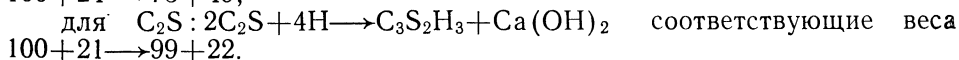
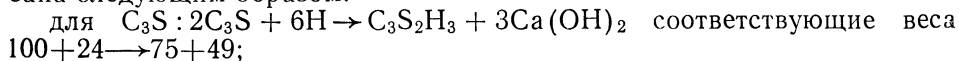
Если гидратация протекает в ограниченном количестве воды, например в цементном тесте и бетоне, полагают, что  $C_3S$  подвергается гидролизу с образованием в конце концов гидросиликата кальция низкой основности  $C_3S_2H_3$  с отделением окиси кальция в виде  $Ca(OH)_2$ . Однако неизвестно, приводит ли гидратация  $C_3S$  и  $C_2S$  к образованию одинаковых гидратов. Так можно полагать на основании данных о теплоте гидратации и удельной поверхности продуктов гидратации, но исследования физическими методами указывают на то, что возможно образование нескольких различных гидросиликатов кальция. Ли полагает, что эти гидраты

<sup>1</sup> Скорость гидратации отдельных минералов цементного клинкера при их совместном присутствии, а также степень гидратации цементов различной тонкости помола изучалась и советскими исследователями. Здесь следует упомянуть представление В. Н. Юнга о структуре цементного камня как микробетона [2]. Оригинальные взгляды развиваются А. Е. Шейкиным и Т. Ю. Якуб [11] на схему процессов гидратации и на роль осмотических явлений в образовании и разрыве оболочек гидратированных новообразований цементных зерен. С. В. Шестоперов [12] изучил роль гипса при гидратации цементов разного минералогического состава и сформулировал представления о «действующем» минералогическом составе цемента, указав, что количество, например, быстрогидратирующегося минерала — трехкальциевого алюмината, способного также и к взаимодействию с гипсом в первые часы гидратации, зависит от тонкости измельчения цемента, от величины его удельной поверхности. (Прим. ред.)

могут быть солями ортокремниевой кислоты ( $H_4SiO_4$ ); при этом возможны четыре значения отношения — окись кальция: двуокись кремния — 1 : 2, 1 : 1, 3 : 2 и 2 : 1. Если бы некоторое количество окиси кальция было адсорбировано или удержано в твердом растворе, то могли бы встретиться и другие значения указанного отношения. Существует веское доказательство образования в результате гидратации  $C_2S$  конечного продукта с величиной отношения окись кальция двуокись кремния, равной 1,65. Это может быть следствием того, что гидратация  $C_3S$  регулируется скоростью диффузии ионов через гидратные оболочки, в то время как гидратация  $C_2S$  определяется скоростью реакции. Кроме того, на образование продуктов гидратации двух силикатов может оказывать влияние температура, поскольку от нее зависит проницаемость геля. Скорости гидратации  $C_3S$  и  $C_2S$  значительно различаются (рис. 1.1).

Общий состав гидросиликатов кальция можно примерно представить как  $C_3S_2H_3$ ; эти гидраты иногда относят к тобермориту кальция из-за структурного сходства с встречающимся в природе минералом. Поскольку образованные при гидратации кристаллы имеют неправильную форму и крайне малые размеры, нет необходимости, чтобы граммоллекулярное отношение воды к двуокиси кремния было целым числом.

Предположив, что  $C_3S_2H_3$  является конечным продуктом гидратации как  $C_3S$ , так и  $C_2S$ , реакция гидратации может быть схематически записана следующим образом:



Таким образом, оба силиката требуют примерно одинакового количества воды для гидратации, но  $C_3S$  образует более чем в два раза больше  $Ca(OH)_2$  по сравнению с  $C_2S$ .

Физические свойства гидросиликатов кальция представляют интерес в связи со способностью цемента схватываться и твердеть. Эти гидраты обычно считают полностью аморфными, однако электронный микроскоп позволяет увидеть их кристаллическую структуру. Интересно отметить, что один из гидратов, обозначенный Тэйлором  $CSH(1)$ , имеет слоистую структуру, аналогичную структуре некоторых глинистых минералов, таких как монтмориллонит и галлуазит.

Отдельные слои в плане по двум осям хорошо закристаллизованы, между тем как расстояния между ними определены менее четко. Такая решетка способна присоединять различные количества окиси кальция без

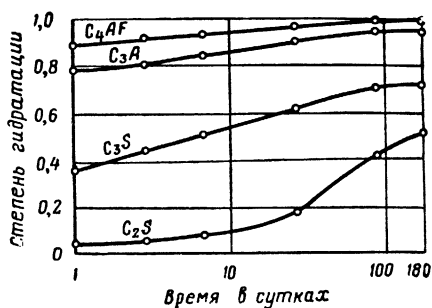


Рис. 1.1. Скорость гидратации клинкерных минералов

существенных изменений, что объясняет переменное соотношение окись кальция: двуокись кремния, упоминавшееся выше. В действительности рентгеноструктурные диаграммы показали, что окись кальция в количестве свыше одной молекулы на молекулу двуокиси кремния удерживается в беспорядочном состоянии. Стейнуор объяснил это образованием твердого раствора и адсорбцией.

Исследования с помощью радиоактивного изотопа  $\text{Ca}^{45}$  показали, что силикаты кальция не гидратируются в твердом состоянии, а безводные силикаты, вероятно, сначала переходят в раствор и затем реагируют с образованием менее растворимых гидросиликатов, которые выпадают из пересыщенных растворов. Такую схему гидратации первым предложил Ле Шателье в 1881 г. \*

Исследования Бернала указывают на то, что гидросиликаты кальция образуются в виде очень тонких волокнистых кристаллов с коротковолонистым повторяющимся элементом размером  $3,65\text{\AA}$ . Это может быть представлено как образование силикатных тетраэдров, соединенных водородными связями. Другие исследования подтвердили существование волокнистых частиц со снопообразными концами, подобных набухающему глинистому минералу галлузиту. Полагают, что существуют различные переходные формы, включая мелкие сферические частицы, но в конце концов все они приобретают волокнистую форму. Интересно отметить, что гидросиликаты кальция характеризуются ростом прочности, аналогичным росту прочности портландцемента. Значительная прочность достигается задолго до того, как реакция гидратации закончится, таким образом представляется, что небольшое количество гидратированных новообразований связывает негидратировавшие частицы: дальнейшая гидратация приводит лишь к незначительному увеличению прочности или сохранению ее на прежнем уровне.

### **ТРЕХКАЛЬЦИЕВЫЙ ГИДРОАЛЮМИНАТ И ДЕЙСТВИЕ ГИПСА**

---

В большинстве цементов  $\text{C}_3\text{A}$  присутствует в сравнительно небольшом количестве, однако его поведение и структурные связи с другими фазами в цементе представляют определенный интерес. Трехкальциевый гидроалюминат образует призматические кристаллы темноокрашенного вещества, вероятно представляющие твердый раствор с другими соединениями, а часто в виде плоских пластинок, окруженных гидросиликатами кальция.

Реакция  $\text{C}_3\text{A}$  с водой проходит очень бурно и приводит к немедленному загустеванию теста, известному как ложное схватывание. Для предотвращения этого явления в цементный клинкер добавляют гипс

---

\* Исследованию процессов растворения минералов, составляющих цементный клинкер, образования пересыщенных растворов и кристаллизации новообразований посвящено значительное число работ советских исследователей. Кинетика растворения изучена В. Б. Ратиновым [17, 18]. Общая схема процессов растворения и образования кристаллического сростка, определяющего прочность цементного камня, дана П. А. Ребиндером и Е. Е. Сегаловой [13, 14]. (Прим. ред.)

( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Гипс и  $\text{C}_3\text{A}$  взаимодействуют между собой с образованием нерастворимого гидросульфоалюмината кальция ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ), но со временем образуется трехкальциевый гидроалюминат. Вероятно, что этому предшествует образование метастабильного соединения  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  за счет исходной высокосульфатной формы гидросульфоалюмината кальция. По мере перехода  $\text{C}_3\text{A}$  в раствор состав изменяется — содержание сульфатов уменьшается непрерывно. Скорость реакции алюминатов довольно высокая, поэтому если это изменение в составе происходит недостаточно быстро, то возможна непосредственная гидратация  $\text{C}_3\text{A}$ . В частности, наблюдаемая обычно максимальная скорость тепловыделения в течение 5 мин после добавления воды к цементу означает, что некоторое количество гидроалюмината кальция образуется в тот период, когда условия для замедления гипсом еще не установились.

Устойчивая форма гидроалюмината кальция, образованная в итоге в цементном камне, вероятно, представляет собой кубические кристаллы  $\text{C}_3\text{AH}_6$ , но возможно, что гексагональный  $\text{C}_4\text{AH}_{12}$  выкристаллизовывается первым и позже приобретает кубическую форму. Таким образом, окончательную реакцию можно представить в следующем виде:  $\text{C}_3\text{A} + 6\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{AH}_6$ .

Стехиометрические соотношения показывают, что 100 частей  $\text{C}_3\text{A}$  реагируют с 40 частями воды (по весу). Это намного больше количества воды, требуемой для гидратации силикатов.

Содержание  $\text{C}_3\text{A}$  в цементе нежелательно: его роль в прочности цементного камня незначительна, за исключением прочности в раннем возрасте; в то же время при воздействии сульфатов на цементный камень расширение вследствие образования гидросульфоалюмината кальция из  $\text{C}_3\text{A}$  может привести к разрушению цементного камня. Однако  $\text{C}_3\text{A}$  необходим при обжиге цементного клинкера. Он действует как плавень — понижает температуру обжига, что содействует соединению окиси кальция и кремнезема при более низких температурах. Поэтому  $\text{C}_3\text{A}$  необходим в процессе производства цемента.  $\text{C}_4\text{AF}$  является также минералом-плавнем. Следует заметить, что если не будет образовываться некоторого количества жидкой фазы при обжиге, то реакции в печи будут протекать намного медленнее и возможно не пройдут полностью.

Гипс реагирует не только с  $\text{C}_3\text{A}$ ; с  $\text{C}_4\text{AF}$  он образует сульфоферрит, а также сульфоалюминат кальция. Присутствие гипса может способствовать ускорению гидратации силикатов.

Количество гипса, добавляемого в цементный клинкер, необходимо тщательно контролировать, так как избыток гипса приводит к расширению и последующему разрушению цементного камня. Оптимальное содержание гипса определяется на основе наблюдений за теплотой гидратации. Обычно за мгновенным максимумом скорости тепловыделения следует второй максимум спустя 4—8 ч после добавления воды к цементу. При правильно выбранном количестве гипса, после того как весь гипс будет связан, останется лишь небольшое количество  $\text{C}_3\text{A}$ , способного участвовать в реакциях. В результате второго максимума на кривой тепловыделения не возникает.

Требуемое количество гипса увеличивается при повышении содержания  $C_3A$  и щелочей в цементе. Увеличение тонкости помола цемента оказывает то же влияние, что и возрастание количества  $C_3A$ , поэтому оно требует повышенного содержания гипса.

Количество вводимого в цементный клинкер гипса обычно выражается в расчете на  $SO_3$  по весу. По стандарту BS 12:1958 максимальное содержание  $SO_3$  2,5% при содержании  $C_3A$  не более 7 и 3% при содержании  $C_3A$  более 7%\*.

### СХВАТЫВАНИЕ

Термином «схватывание» характеризуют процесс загустевания цементного теста. Хотя во время схватывания тесто приобретает некоторую прочность, для практических целей целесообразно отличать схватывание от твердения, которое приводит к росту прочности схватившегося цементного теста.

На практике термины начало и конец схватывания используются для характеристики произвольно выбранных стадий схватывания. Возможно, что схватывание вызывается избирательной гидратацией клинкерных минералов — первыми вступают в реакцию  $C_3A$  и  $C_3S$ . Добавка гипса замедляет образование гидроалюмината кальция, и в результате  $C_3S$  схватывается первым.

В цементе с достаточной добавкой гипса каркас гидратированного цементного теста образуется из гидросиликата кальция. Если бы  $C_3A$  схватывался первым, то это привело бы к образованию рыхлой структуры гидроалюмината кальция. Остальные клинкерные минералы гидратировались бы внутри этого пористого каркаса, что отрицательно повлияло бы на прочностные характеристики цементного камня.

Считают, что наряду со скоростью образования кристаллогидратов процесс схватывания определяется развитием оболочек вокруг цементных зерен и взаимной коагуляцией составляющих цементного теста.

Процесс схватывания сопровождается температурными изменениями в цементном тесте: начало схватывания соответствует быстрому подъему температуры и конец схватывания — температурному максимуму. В это же время наблюдается также резкое падение электропроводности, поэтому были сделаны попытки определять сроки схватывания электрическим методом.

С увеличением температуры сроки схватывания цемента уменьшаются, но при температуре выше  $30^\circ C$  может наблюдаться обратный эффект. При низкой температуре схватывание замедляется<sup>1</sup>.

---

\* По ГОСТ 10178—62 допускается содержание гипса в цементе не более 3,5% в расчете на  $SO_3$ . (Прим. ред.)

<sup>1</sup> Процесс схватывания цементного теста детально изучался П. А. Ребиндером и его школой. Были разработаны специальные приборы для определения изменения пластической прочности цементного теста [13, 15] и развиты представления о природе процессов схватывания и твердения [14, 16]. (Прим. ред.)



## ЛОЖНОЕ СХВАТЫВАНИЕ

Ложным схватыванием называют ненормальное преждевременное загустевание цемента в течение нескольких минут после его перемешивания с водой. Ложное схватывание отличается от мгновенного схватывания тем, что при нем выделяется незначительное количество тепла. Повторное перемешивание цементного теста без добавки воды восстанавливает и поддерживает пластичность цементного теста до тех пор, пока оно не схватится обычным способом и без потери прочности.

Некоторые причины ложного схватывания следует искать в дегидратации гипса в случае его помола с недостаточно охлажденным клинкером; при этом образуются полугидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ) или ангидрит ( $\text{CaSO}_4$ ), которые при перемешивании цемента с водой гидратируются с образованием гипса. Таким образом, схватывание гипса имитирует общее загустевание цементного теста.

Другая причина появления ложного схватывания может быть связана с наличием щелочей в цементе. При хранении цемента они образуют карбонаты, которые, в свою очередь, реагируют с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  — продуктом гидролиза  $\text{C}_3\text{S}$  — с образованием  $\text{CaCO}_3$ . Последний осаждается, вызывая загустевание теста.

Были высказаны также предположения, что ложное схватывание может быть следствием активации  $\text{C}_3\text{S}$  в результате аэрации в условиях умеренно высокой влажности. Вода адсорбируется на зернах цемента, и активированные этим поверхности зерен могут быстро соединяться с большим количеством воды при перемешивании: такая быстрая гидратация будет также вызывать ложное схватывание.

Контрольные испытания на заводе позволяют гарантировать отсутствие ложного схватывания у цемента. Однако если появится ложное схватывание, оно может быть устранено повторным перемешиванием бетонной смеси без добавки воды. Хотя это не так легко, однако удобоукладываемость будет повышена и бетон может быть уложен обычным способом.

## ТОНКОСТЬ ПОМОЛА ЦЕМЕНТА

Известно, что помол клинкера с добавкой гипса является одним из последних этапов в производстве цемента. Так как гидратация начинается с поверхности цементных частиц, то суммарная площадь их поверхности будет определять количество материала, способного прогидратироваться. Таким образом, скорость гидратации зависит от тонкости помола цемента, и для быстрого нарастания прочности необходима высокая тонкость помола (см. рис. 1. 2.).

С другой стороны, затраты на тонкий помол цемента весьма велики, к тому же чем выше тонкость помола цемента, тем быстрее он снижает свою активность при хранении на воздухе. Тонкомолотый цемент характеризуется ускоренной реакцией щелочей с реакционноспособными заполнителями, вызывает в тесте повышенную усадку и больше предрасположен к трещинообразованию. Однако тонкомолотый цемент имеет меньшее водоотделение, чем грубомолотый.

С повышением тонкости помола увеличивается требуемое количество гипса для регулирования сроков схватывания, так как в тонкомолотом цементе большее количество  $C_3A$  способно к ранней гидратации. Содержание воды в тесте стандартной консистенции больше в случае тонкомолотого цемента, но увеличение тонкости помола цемента повышает удобоукладываемость бетонной смеси.

Это кажущееся несоответствие может частично объясняться тем, что при определениях консистенции цементного теста и удобоукладываемости измеряются различные свойства цементного теста; к тому же случайно вовлеченный воздух влияет на удобоукладываемость цементного теста, а цементы различной тонкости помола могут содержать различное количество воздуха.

Очевидно, что тонкость помола — важнейшее свойство цемента, поэтому ее следует тщательно контролировать. Ранее тонкость помола характеризовалась просеиванием через сито. Остаток по весу на британском стандартном сите № 170 не должен был превышать у обычных портландцементов 10% и у быстротвердеющих портландцементов 5%. Цемент, удовлетворяющий этим условиям, не будет содержать избытка крупных зерен, которые из-за

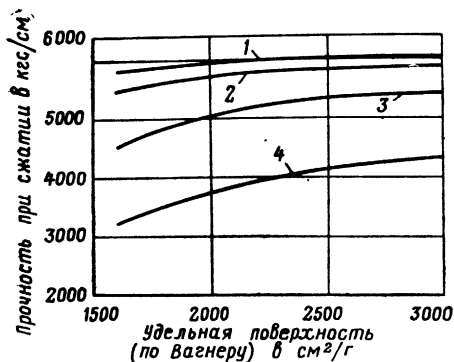


Рис. 1.2. Зависимость прочности бетона при сжатии в различном возрасте от удельной поверхности цемента

Возраст: 1 — 1 год; 2 — 90 сут.; 3 — 28 сут.; 4 — 7 сут.

своей сравнительно небольшой удельной поверхности слабо участвуют в процессах гидратации.

Однако ситовой анализ не дает информации о размере зерен более мелких, чем размер отверстий британского стандартного сита № 170, хотя именно более мелкие зерна оказывают огромное влияние на гидратацию в раннем возрасте. Попытки использовать сита с меньшими размерами отверстий, вплоть до № 300, были безуспешными из-за засорения чрезвычайно мелкой сетки сита.

Поэтому стандартом BS 12:1958 предусматривается испытание по определению удельной поверхности цемента, т. е. общей площади поверхности зерен в  $см^2$  на 1 г. В США удельную поверхность цемента определяют с помощью турбидиметра Вагнера (стандарт ASTM C 115 — 59)\*.

В соответствии с требованиями BS 12:1958 удельная поверхность обычного портландцемента должна быть не менее  $2250 см^2/г$  и быстротвердеющего — не менее  $3250 см^2/г$ .

\* В СССР разработан и стандартизирован метод определения удельной поверхности по воздухопроницаемости (ГОСТ 310—60). Величина удельной поверхности, определяемой этим методом, составляет  $2500—3500 см^2/г$  для обычного портландцемента и до  $3500—4500 см^2/г$  для быстротвердеющего. (Прим. ред.)

Минимальная удельная поверхность шлакопортландцемента составляет  $2250 \text{ см}^2/\text{г}$  (BS 146: 1958) и портландцемента с умеренной экзотермией —  $3200 \text{ см}^2/\text{г}$  (BS 1370: 1958).

В течение последних 20 лет наблюдается общая тенденция размалывать цемент более тонко, поэтому обычный товарный портландцемент, производимый в Англии, имеет удельную поверхность большую, чем минимум, указанный в BS 12: 1958. Среднее значение в настоящее время составляет  $3000 \text{ см}^2/\text{г}$ .

Глиноземистый цемент обычно размалывается более грубо, чем портландцемент. В соответствии с требованиями BS 915: 1947 удельная поверхность глиноземистого цемента должна быть не менее  $2250 \text{ см}^2/\text{г}$ ; на практике встречаются лишь немногие более высокие значения.

### **СТРУКТУРА ГИДРАТИРОВАННОГО ЦЕМЕНТА**

Многие механические свойства цементного камня и бетона зависят не столько от химического состава гидратированного цемента, сколько от физической структуры продуктов гидратации. Поэтому необходимо иметь правильное представление о физических свойствах цементного геля.

Свежеприготовленное цементное тесто представляет собой пластичную структуру из частиц цемента в воде, но как только тесто схватилось, его кажущийся или общий объем остается примерно постоянным. На любой стадии гидратации твердеющее тесто (цементный камень) состоит из различных гидратных новообразований, которые в целом относят к гелю, кристаллов  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , некоторых второстепенных компонентов, негидратированного цемента и объема пор, которые были заполнены водой. Эти поры называют капиллярными порами, но в геле существуют внутренние пустоты, называемые порами геля. Таким образом, в гидратированном тесте различают два класса пор, представленных схематически на рис. 1.3. Крупные черные точки на схеме представляют гелевые частицы; промежутки между ними — это гелевые поры; пространства, обозначенные буквой С, представляют капиллярные пустоты (размер гелевых пор для наглядности увеличен).

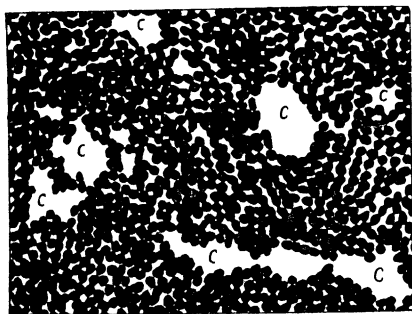


Рис. 1.3. Упрощенная модель структуры цементного камня

Так как большинство продуктов гидратации имеют коллоидные размеры, во время гидратации площадь поверхности твердой фазы значительно увеличивается, и на этой поверхности адсорбируется большое количество свободной воды. Если при гидратации нет поступления воды в цементное тесто извне, то вода затвердения будет расходоваться для

реакции гидратации. При этом ее количество уменьшится настолько, что ее будет недостаточно для насыщения поверхности твердой фазы, что приведет к уменьшению относительной влажности в тесте. Это явление известно как самовысушивание. Так как гель может образовываться только в пространстве, наполненном водой, то самовысушивание приводит к более низкой степени гидратации по сравнению с тестом, твердевшим во влажных условиях. Однако при  $V/C$  свыше 0,5 количество воды затворения является достаточным для того, чтобы в случае самовысушивания теста степень гидратации была такой же, как у теста, твердевшего во влажных условиях.

### ОБЪЕМ ПРОДУКТОВ ГИДРАТАЦИИ

Приближенный общий объем, который могут занять продукты гидратации, состоит из абсолютного объема сухого цемента и объема воды, необходимой для замеса. Мы будем пренебрегать небольшой потерей воды в результате выделения цементного молока на поверхности бетона и уплотнения теста в пластичном состоянии. Как было показано выше,  $C_3S$  и  $C_2S$  химически связывают воду в количестве соответственно примерно 24 и 21% веса этих двух силикатов; соответствующие значения для  $C_3A$  и  $C_4AF$  составляют 40 и 37%.

Приведенные цифры не являются абсолютно точными, так как наши знания о продуктах гидратации цемента не позволяют более определенно говорить о количестве химически связываемой ими воды. Поэтому лучше всего основываться на представлении о неиспаряемой воде, количество которой можно определить по способу, описанному в одном из последующих разделов. Это количество воды, вычисленное при определенных условиях, составляет 23% веса безводного цемента (хотя для цемента типа II это значение может снизиться до 18%).

Удельный вес продуктов гидратации цемента таков, что они занимают больший объем, чем абсолютный объем негидратированного цемента, но меньший, чем суммарный объем сухого цемента и неиспаряющейся воды, примерно на 0,254 от объема последней.

Средняя величина удельного веса продуктов гидратации (включая поры в максимально возможной плотной структуре) в насыщенном водной состоянии составляет 2,16.

В качестве примера рассмотрим гидратацию 100 г цемента. Принимая удельный вес сухого цемента равным 3,15, получим абсолютный объем негидратированного цемента равным  $\frac{100}{3,15} = 31,8 \text{ см}^3$ . Неиспаряющаяся вода, составляет 23% веса цемента, т. е.  $23 \text{ см}^3$ . Твердые продукты гидратации занимают объем, равный сумме объемов безводного цемента и воды за вычетом составляющей 0,254 от объема неиспаряющейся воды, т. е.  $31,8 + 0,23 \cdot 100 (1 - 0,254) = 48,9 \text{ см}^3$ .

Так как тесто в этих условиях имеет пористость, равную приблизительно 28%, то объем гелевой воды  $W_g$  составит  $\frac{W_g}{48,9 + W_g} = 0,28$ , отсюда  $W_g = 19 \text{ см}^3$  и объем гидратированного цемента  $48,9 + 19 = 67,9 \text{ см}^3$ .

Таким образом имеем:

Вес сухого цемента . . . . .	100 г
Абсолютный объем сухого цемента . . . . .	31,8 см <sup>3</sup>
Вес связанной воды . . . . .	23 г
Объем гелевой » . . . . .	19 см <sup>3</sup>
Общее количество воды в смеси . . . . .	42 »
<i>V/C</i> по весу . . . . .	0,42
<i>V/C</i> по объему . . . . .	1,32
Объем гидратированного цемента . . . . .	67,9 см <sup>3</sup>
Первоначальный объем цемента и воды . . . . .	73,8 »
Уменьшение объема вследствие гидратации . . . . .	5,9 »
Объем продуктов гидратации на 1 см <sup>3</sup> сухого цемента . . . . .	2,1 »

Следует отметить, что было сделано допущение, что гидратация имеет место в замкнутом объеме при отсутствии притока воды или при ее удалении из системы. Объемные изменения схематически показаны на рис. 1.4. «Уменьшение объема» на 5,9 см<sup>3</sup> представляет пустое капиллярное пространство, распределенное по всему цементному камню.

Приведенные цифры являются лишь приблизительными, однако если общее количество воды будет меньше, чем 42 см<sup>3</sup>, то его будет недостаточно для полной гидратации, так как гель может образовываться только тогда, когда воды достаточно и для химических реакций, и для заполнения гелевых пор.

Вода геля не может быть использована для гидратации еще негидратированного цемента, так как она прочно удерживается и поэтому не может перейти в капилляры.

Таким образом, когда гидратация в изолированном образце достигла такого состояния, при котором количество связанной воды составило примерно половину от исходного, дальнейший процесс прекращается. Из этого следует также, что полная гидратация в изолированном образце возможна лишь тогда, когда количество воды затворения в два раза превышает количество воды, требуемой для химической реакции, т. е. смесь имеет *V/C* = 0,5 (по весу). В действительности в приведенном примере гидратация не пройдет полностью, так как она прекращается даже до того, как капиллярная вода будет израсходована. Было установлено, что гидратация значительно замедляется, когда давление водяных паров падает ниже величины, составляющей 0,8 до давления насыщения.

Рассмотрим гидратацию теста, твердеющего в воде. В этом случае вода может впитываться, когда капиллярные поры частично освобождаются от воды в результате гидратации. Как показано выше, 100 г цемента (31,8 см<sup>3</sup>) при полной гидратации будут занимать объем 67,9 см<sup>3</sup>. Таким образом, чтобы не оставалось негидратированного цемента и не появ-

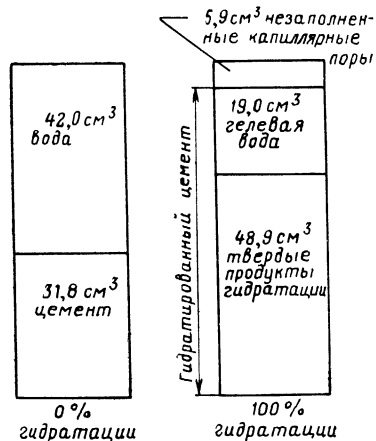


Рис. 1.4. Схема объемных изменений в цементном тесте с *V/C* = 0,42 в результате гидратации цемента

лялись капиллярные поры, исходное количество воды для замеса должно составлять приблизительно  $(67,9 - 31,8) = 36,1 \text{ см}^3$ .

Это соответствует  $V/C$ , равному 1,14 по объему или 0,36 по весу. В других работах предложено принять  $V/C$  равным соответственно 1,2 и 0,38.

Если фактическое  $V/C$  смеси с учетом водоотделения будет менее 0,38 по весу, то полная гидратация цемента невозможна, так как имеющийся объем недостаточен для размещения в нем всех продуктов гидратации. Следует напомнить, что гидратация может протекать только в воде внутри капилляров. Например, если мы имеем смесь из 100 г цемента ( $31,8 \text{ см}^3$ ) и 30 г воды, то воды было бы достаточно для гидратации  $X$  граммов цемента, определяемых следующим образом.

Сокращение объема при гидратации (контракция) составит  $0,23X \times 0,254 = 0,0585X$ . Объем, занимаемый твердыми продуктами гидратации, будет  $\frac{X}{3,15} + 0,23X - 0,0585X = 0,489X$ .

Пористость цементного камня  $\frac{W_g}{0,489X + W_g} = 0,28$ , и общее количество воды  $0,23X + W_g = 30$ , отсюда  $X = 71,5 \text{ г} = 22,7 \text{ см}^3$  и  $W_g = 13,5 \text{ г}$ .

Таким образом, объем гидратированного цемента составит  $0,489 \times 71,5 + 13,5 = 48,5 \text{ см}^3$ . Объем негидратированного цемента  $31,8 - 22,7 = 9,1 \text{ см}^3$ .

Следовательно, объем незаполненных капилляров будет  $(31,8 + 30) - (48,5 + 9,1) = 4,2 \text{ см}^3$ .

Если вода может поступать извне, то в дальнейшем некоторое дополнительное количество цемента может гидратироваться и гидратация будет происходить до тех пор, пока ее продукты не займут объем, превышающий на  $4,2 \text{ см}^3$  объема сухого цемента. Мы определили, что  $22,7 \text{ см}^3$  цементного камня занимают объем  $48,5 \text{ см}^3$ , т. е. продукты гидратации  $1 \text{ см}^3$  цемента имеют объем  $\frac{48,5}{22,7} = 2,13 \text{ см}^3$ . Таким образом,  $4,2 \text{ см}^3$  — это

объем продуктов гидратации  $y \text{ см}^3$  цемента, отсюда  $\frac{4,2 + y}{y} = 2,13$ ; следовательно,  $y = 3,7 \text{ см}^3$ .

Объем еще негидратированного цемента составит  $31,8 - (22,7 + 3,7) \approx 6 \text{ см}^3 \approx 19 \text{ г}$ . Другими словами, от первоначального веса цемента осталось 19% негидратированного цемента, который уже не сможет прогидратироваться, так как все доступное пространство будет занято гелем, т. е. отношение гель: пространство для цементного камня равно 1. К этому можно добавить, что содержание негидратированного цемента не оказывает вредного влияния на прочность цементного камня. Действительно, для всякого цементного камня с отношением гель: пространство<sup>1</sup> = 1 чем выше содержание негидратированного цемента (т. е. чем ниже  $V/C$ ), тем больше прочность. Это, возможно, объясняется тем, что в таком цементном камне слои гидратированных новообразований, окру-

<sup>1</sup> В дальнейшем под этим отношением в соответствии с представлениями Пауэрса подразумевается отношение объема геля к общему объему пространства, занимаемого гелем, включая объем пор геля.

жающие негидратированные зерна, более тонки.

Можно привести данные по прочности порядка  $2800 \text{ кгс/см}^2$ , которые получил Абрамс, используя смеси с  $V/C=0,38$  по весу. Естественно, что для получения уплотненной смеси такого состава необходимо приложить к ней значительное давление.

С другой стороны, если  $V/C$  выше  $0,38$ , то может прогидратироваться весь цемент, но и капиллярные поры будут также сохранены в цементном камне. Некоторые капилляры будут содержать воду, являющуюся избыточной для смеси, другие будут впитывать воду извне. На рис. 1.5 приведены относительные объемы негидратированного цемента, продуктов гидратации и капилляров для смесей с различными  $V/C$ .

Как наиболее характерный пример рассмотрим гидратацию теста с  $V/C=0,475$ , помещенного в замкнутом объеме. Возьмем  $126 \text{ г}$  сухого цемента, который занимает объем  $40 \text{ см}^3$ . Следовательно, объем воды будет:  $0,475 \cdot 126 = 60 \text{ см}^3$ . Эти соотношения в составе смеси показаны в левой части диаграммы на рис. 1.6, но в действительности цемент и вода перемешаны и вода образует капиллярную систему между негидратированными цементными зернами.

Рассмотрим состояние, когда цемент уже гидратирован полностью. Количество испарившейся воды будет  $0,23 \cdot 126 = 29 \text{ см}^3$ . Обозначив объем гелевой воды  $W_g$ , составим уравнение

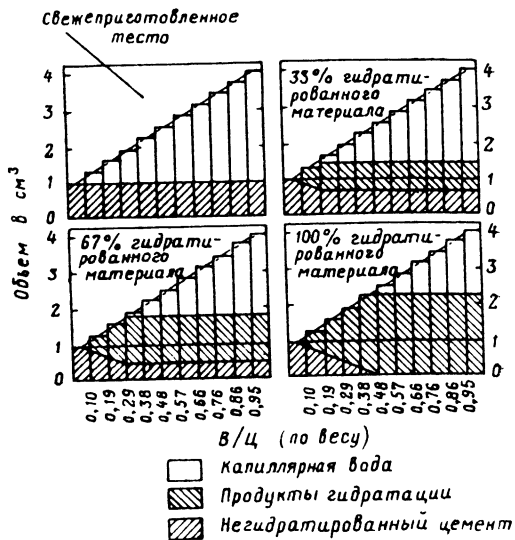


Рис. 1.5. Состав цементного камня на различных стадиях гидратации. Указанное процентное содержание относится только к такому цементному камню, у которого заполненное водой пространство позволяет разместить продукты гидратации при данной степени гидратации

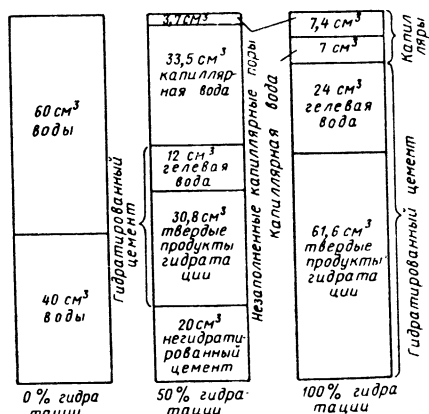


Рис. 1.6. Диаграмма состава цементного камня по объему на различных стадиях гидратации

$$\frac{W_g}{40 + 29(1 - 0,254) + W_g} = 0,28,$$

отсюда объем гелевой воды  $24 \text{ см}^3$  и объем гидратированного цемента  $85,6 \text{ см}^3$ . Таким образом,  $60 - (29 + 24) = 7 \text{ см}^3$  воды остается в тесте в качестве капиллярной воды. Кроме этого,  $100 - (85,6 + 7) = 7,4 \text{ см}^3$  занимает не заполненные водой капилляры. Если образец доступен для воды во время твердения, то эти капилляры будут заполнены поглощенной извне водой.

Таково положение при 100% -ной гидратации, когда отношение гель : пространство равно 0,856, что показано в правой части диаграммы рис. 1. 6. В центре этой диаграммы даны объемы различных компонентов при 50% гидратации цемента. В этом случае отношение гель : пространство равно:

$$\frac{\frac{1}{2} [40 + 29(1 - 0,254) + 24]}{100 - 20} = 0,535.$$

### КАПИЛЛЯРНЫЕ ПОРЫ

На любой стадии гидратации капиллярные поры представляют собой часть общего объема, которая не была заполнена продуктами гидратации. Так как продукты гидратации занимают объем, превышающий более чем в два раза объем первоначальной твердой фазы (т. е. цемента), то по мере гидратации цемента объем капиллярной системы пор уменьшается.

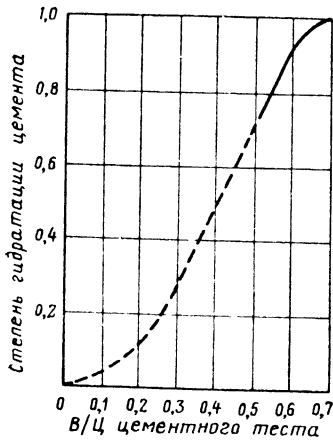


Рис. 1.7. Зависимость между  $V/C$  и степенью гидратации, при которой капилляры перестают быть непрерывными

Таким образом, капиллярная пористость цементного камня зависит как от  $V/C$  смеси, так и от степени гидратации. Скорость твердения цемента сама по себе не имеет значения, но вид цемента влияет на степень гидратации, достигаемую в определенном возрасте. При  $V/C$  более 0,38 объем геля недостаточен для заполнения всего имеющегося пространства, поэтому некоторый объем капиллярных пор будет оставаться даже после завершения процесса гидратации.

Капиллярные поры невозможно видеть в оптическом микроскопе, но было установлено, что их размер составляет порядка  $12,7 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ . Они различаются по форме, но, как известно из результатов определения проницаемости, образуют взаимосвязанную систему, беспорядочно распределенную по всему цементному камню. Эти взаимосвязанные капиллярные поры главным об-



разом и определяют проницаемость затвердевшего цементного камня и его морозостойкость.

Однако гидратация увеличивает содержание твердой фазы в цементном камне. В затвердевшем, плотном цементном камне капилляры могут оказаться заблокированными гелем и разделенными на части, таким образом, они превращаются в капиллярные поры, соединенные между собой порами геля. Отсутствие непрерывных капилляров есть следствие сочетания определенного  $V/C$  и достаточно длительного периода влажного твердения; требуемая степень гидратации при различных  $V/C$  для обычного портландцемента приводится на рис. 1. 7.

Фактическое время, необходимое для достижения соответствующей степени гидратации, зависит от свойств испытываемого цемента.

Примерное время, необходимое для получения степени гидратации, при которой капилляры становятся разделенными на части, приведено ниже.

$\frac{V}{C}$ по весу	Время
0,4	3 суток
0,45	7 »
0,5	14 »
0,6	6 месяцев
0,7	1 год

При  $V/C$  более 0,7 даже при полной гидратации не может быть образовано достаточно геля для блокирования всех капилляров. Для цемента с чрезвычайно высокой тонкостью помола максимальное  $V/C$  будет еще выше, возможно до 1,3 и, наоборот, для цемента с крупными частицами оно будет ниже — 0,7. Отсутствие непрерывных пор считается необходимым условием получения хорошего бетона.

### ПОРЫ ГЕЛЯ

Гель является пористым веществом, поскольку он может содержать большое количество испаряющейся воды, а поры геля соединяют внутренние пространства между гелевыми частицами. Поры геля намного меньше капиллярных, их размер  $15-20\text{Å}$  в диаметре, лишь на один порядок больше размера молекул воды. Поэтому давление водяного пара и подвижность адсорбированной воды отличаются от соответствующих свойств свободной воды. Количество обратимой воды указывает непосредственно на пористость геля.

Поры геля занимают объем, составляющий около 28% общего объема геля. Фактическое значение пористости геля является характерным

для данного цемента и в основном не зависит от  $V/C$  смеси и степени гидратации. Следовательно, на всех стадиях гидратации образуется гель со сходными свойствами и продолжающаяся гидратация не влияет на уже образовавшиеся продукты. При увеличении общего объема геля с развитием гидратации, увеличивается также и объем пор геля. С другой стороны, объем капиллярных пор уменьшается с развитием гидратации.

Величина пористости, равная 28%, означает, что поры геля занимают пространство, эквивалентное около  $1/3$  объема твердой фазы геля. Отношение поверхности твердой фазы геля к ее объему равно соответствующему отношению для сферы диаметром около 90 Å. Это не должно истолковываться таким образом, что гель состоит из сферических элементов; его частицы в основном имеют вид волокон. Связки таких волокон образуют сетку, содержащую более или менее аморфное промежуточное вещество.

Пористость геля можно выразить и другим способом, считая, что объем пор превышает примерно в три раза объем воды, достаточный для образования мономолекулярного слоя на всей поверхности твердой фазы геля.

Определение адсорбции воды позволяет установить, что удельная поверхность геля равна примерно  $5,5 \times 10^6 \text{ см}^2/\text{см}^3$ , или около 2 млн.  $\text{см}^2/\text{г}$ . Для сравнения напомним, что удельная поверхность негидратированного цемента находится в пределах 2000—5000  $\text{см}^2/\text{г}$ . В связи с рассмотрением пористой структуры уместно заметить, что цементный камень, полученный при автоклавной обработке при высоком давлении, имеет удельную поверхность лишь около 70 000  $\text{см}^2/\text{г}$ . Это указывает на совершенно различный размер частиц продуктов гидратации при высоком давлении и высокой температуре. Представляется, что пропаривание приводит к образованию почти полностью микрокристаллического вещества.

Удельная поверхность цемента, твердевшего в нормальных условиях, зависит от температуры твердения и химического состава цемента. Было показано, что отношение удельной поверхности к весу неиспаряющейся воды (которая пропорциональна величине, определяемой уравнением  $0,23(C_3S) + 0,32(C_2S) + 0,317(C_3A) + 0,368(C_4AF)$ , где символы в скобках обозначают процентное содержание соответствующих клинкерных минералов в цементе. Как видно, имеются небольшие различия в величинах коэффициентов для трех последних минералов, и это указывает на то, что удельная поверхность цементного камня мало меняется при изменении состава цемента. Сравнительно низкий коэффициент для  $C_3S$  есть следствие того, что  $C_3S$  образует большое количество микрокристаллов  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , которые имеют удельную поверхность намного ниже, чем гель.

Пропорциональная зависимость между весом воды, образующей мономолекулярный слой на поверхности геля, и весом неиспаряющейся воды в тесте для данного цемента означает, что гель с примерно одинаковой удельной поверхностью образуется в течение всего процесса гидратации, т. е. происходит постоянное образование частиц одинакового размера. При этом размеры уже образовавшихся гелевых частиц не изменяются. Однако это не характерно для цемента с высоким содержанием  $C_2S$ .

Существуют две классические теории твердения и роста прочности цемента<sup>1</sup>. Так, Ле Шателье в 1882 г. открыл, что продукты гидратации цемента имеют меньшую растворимость, чем исходные компоненты, вследствие чего гидраты выделяются из пересыщенного раствора. Выделившиеся из раствора гидраты представляют собой переплетенные удлиненные кристаллы с высокими адгезионными и когезионными свойствами.

По коллоидной теории, выдвинутой Михаэлисом в 1893 г., кристаллический гидроалюминат, гидросульфоалюминат и гидроокись кальция обеспечивают первоначальную прочность. Насыщенная известью вода взаимодействует с силикатами с образованием почти нерастворимого гидросиликата кальция в виде студенистой массы. Эта масса постепенно затвердевает вследствие потери воды как за счет внешнего высыхания, так и за счет гидратации внутренних негидратированных ядер цементных зерен.

В свете современных знаний представляется, что эти обе теории содержат элементы истины и не противоречат одна другой. Так, в частности, специалисты в области коллоидной химии выяснили, что многие, если не большинство, коллоиды состоят из кристаллических частиц. Эти частицы имеют малые размеры и, как следствие, большую площадь поверхности, что придает им свойства, отличающие их от обычных твердых веществ. Коллоидные свойства в большей степени определяются площадью поверхности частиц, а не неоднородностью их внутреннего строения.

Было установлено, что после перемешивания портландцемента с большим количеством воды образуется в течение нескольких часов раствор, пересыщенный  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и содержащий гидросиликат кальция в метастабильном состоянии. Этот гидрат быстро выделяется согласно теории Ле Шателье; последующее твердение может быть следствием удаления воды из продуктов гидратации, как полагал Михаэлис.

Дальнейшие экспериментальные работы показали, что гидросиликаты кальция в действительности образуются в виде чрезмерно малых (субмикроскопических) переплетающихся кристаллов, которые имеют свойства геля. При перемешивании цемента с небольшим количеством воды степень кристаллизации, по-видимому, меньше, поэтому образуются кристаллы искаженной формы. Таким образом, спор Ле Шателье и Михаэлиса в значительной степени сводится к вопросу о терминологии, так как мы имеем дело с гелем, состоящим из кристаллов.

---

<sup>1</sup> Теория твердения цемента была разработана А. А. Байковым [19], который развил представления Ле Шателье и Михаэлиса. В дальнейшем в теорию твердения на основании новых данных внесли большой вклад советские ученые: В. Н. Юнг [2], В. В. Журавлев [20], Ю. М. Бутт и В. В. Тимашев [21, 22], С. Д. Огороков [23, 24], А. Ф. Полак [25], В. Б. Ратинов [17, 18], В. Б. Ратинов, А. Е. Шейкин [28], П. А. Ребиндер и Е. Е. Сегалова [13, 14, 26, 27], А. Е. Шейкин [11], Н. А. Торопов [6], О. П. Мчедлов-Петросян [30] и др. (*Прим. ред.*)

Для удобства считают, что термин «цементный гель» охватывает и кристаллическую гидроксид кальция. Таким образом, гель означает связную массу гидратированного цемента в виде максимально плотного цементного камня, т. е. содержащего в себе только поры геля; характерная пористость геля составляет около 28%. Истинная природа прочности геля не полностью раскрыта, но, вероятно, ее суть заключается в наличии двух типов когезионных связей.

Первый тип связей — физическое притяжение между твердыми поверхностями, разделенными только небольшими порами геля диаметром 15—20 Å; это притяжение обычно вызывается ван-дер-ваальсовыми силами.

Источником второго типа когезии служат химические связи. Так как цементный гель является ограниченно набухающим веществом (т. е. частицы не могут диспергироваться при добавлении воды), то, по-видимому, частицы геля перекрестно соединены химическими связями. Эти связи намного сильнее ван-дер-ваальсовых сил, однако химические связи охватывают только небольшую часть пограничных частиц геля. С другой стороны, большая площадь поверхности, такая, как, например, у цементного геля, не является необходимым условием получения высокой прочности, что показывает, например, развитие чрезвычайно высоких гидравлических свойств в цементном камне с небольшой удельной поверхностью, полученной при автоклавной обработке.

Таким образом, мы не можем установить относительную роль физических или химических связей, но нет сомнения в том, что и те и другие способствуют получению высокой прочности цементного камня.

### **ВОДА В ЦЕМЕНТНОМ КАМНЕ**

О присутствии воды в цементном камне уже неоднократно упоминалось. Цементное тесто является гигроскопическим веществом вследствие гидрофильного характера частиц цемента и наличия в нем субмикроскопических пор. Фактическое содержание воды в цементном камне зависит от влажности окружающей среды. В частности, капиллярные поры из-за их сравнительно большого размера осушаются в тех случаях, когда относительная влажность окружающей среды падает ниже примерно 45%, в порах геля вода адсорбируется даже при очень низкой влажности среды.

Таким образом, можно видеть, что вода в цементном камне может удерживаться с различной степенью прочности связи. С одной стороны, имеется свободная вода, с другой — химически связанная, образующая определенную часть гидратированных соединений. Между этими двумя крайними категориями находится вода геля, которая может удерживаться в цементном камне различными силами.

Вода, удержанная поверхностными силами частиц геля, называется адсорбционной водой. Часть этой воды, которая по данным некоторых исследователей удерживается между поверхностями определенных плоскостей в кристалле, называется цеолитовой водой.

Вода решетки — это часть кристаллизационной воды, которая химически не связана с основными компонентами решетки.

Свободная вода удерживается в капиллярах и находится вне поля действия поверхностных сил твердой фазы.

В настоящее время нет методики испытаний, которая позволила бы определить количество воды в указанных различных ее состояниях. Также нелегко предсказать эти величины исходя из теоретических представлений, поскольку величина энергии связи воды в гидрате такого же порядка, как и величина энергии связи адсорбированной воды<sup>1</sup>.

По существующей классификации полезная для исследовательских целей вода в цементном камне подразделяется на воду испаряющуюся и испаряющуюся.

Это разделение достигается при высушивании цементного камня до установившегося равновесия (т. е. до постоянного веса) при определенном давлении пара. Обычно высушивание выполняется при величине давления пара  $8 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст., получаемого над  $Mg(ClO_4)_2 \cdot 2H_2O$ . Недавно было применено высушивание цементного камня под вакуумом, соединенным с влагоуловителем, охлажденным до температуры  $-79^\circ C$ . Количество испаряющейся воды может быть определено также путем высушивания при повышенной температуре, обычно  $105^\circ C$ , в результате или вымораживания, или удаления с растворителем.

Все эти методы в сущности основаны на разделении воды в соответствии с возможностью ее удаления из цементного камня при определенном пониженном давлении водяного пара. Такое деление неизбежно является в какой-то части произвольным, поскольку зависимость между давлением водяного пара и содержанием воды в цементном камне имеет непрерывный характер. В противоположность кристаллогидратам в этой зависимости нет характерных точек, соответствующих определенным стехиометрическим количествам воды.

В целом, испаряющаяся вода включает почти всю химически связанную воду, а также некоторое количество воды, не удерживаемой химическими связями. Эта вода характеризуется более низким давлением пара, чем вода в окружающей атмосфере; количество такой воды в действительности есть непрерывная функция давления окружающего пара.

Количество испаряющейся воды увеличивается по мере развития гидратации, но в насыщенном водой цементном камне количество испаряющейся воды никогда не может превысить половину общего количества имеющейся воды. В достаточно полно гидратированном цементе количество испаряющейся воды составляет около 18% веса безводного материала; такое соотношение возрастает примерно до 23% в полностью гидратированном цементе. Это вытекает из пропорциональной зависимости между количеством испаряющейся воды и объемом твердой части цементного камня, при этом последний объем может быть использован для определения количества присутствующего цементного геля, т. е. степени гидратации.

<sup>1</sup> В работах М. Ф. Казанского и В. М. Казанского [29] описана методика определения форм связи воды с поверхностью твердой фазы по кривым десорбции влаги при сушке. (Прим. ред.)

Способ удержания воды в цементном камне определяет энергию связи. Например, 400 калорий необходимо для связывания 1 г неиспаряющейся воды, в то время как энергия кристаллизационной воды  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  составляет 850 калорий на 1 г. Кроме того, плотность воды различна и составляет примерно 1,2 для неиспаряющейся воды, 1,1 для воды геля и 1 для свободной воды. Было показано, что увеличение плотности адсорбционной воды при ее низких поверхностных концентрациях не есть результат уплотнения, а вызывается ориентацией молекул в адсорбированной фазе вследствие действия поверхностных сил.

### ТЕПЛОТА ГИДРАТАЦИИ ЦЕМЕНТА

Как и множество химических реакций, реакция гидратации клинкерных минералов имеет экзотермический характер, при этом цемент выделяет до 120 кал/г. Так как теплопроводность бетона сравнительно низка, то внутри массивных бетонных конструкций гидратация приводит к значительному подъему температуры. В то же время наружная часть бетонного массива теряет некоторое количество тепла, так что устанавливается резкий градиент температуры, что при последующем охлаждении внутренней части может привести к образованию трещин.

С другой стороны, тепловыделение при гидратации цемента может препятствовать замерзанию воды в капиллярах свежееуложенного бетона в холодную погоду, поэтому высокое тепловыделение в данном случае является положительным фактором. Ясно, что желательно знать величину тепловыделения различных цементов, чтобы выбрать наиболее подходящий вид цемента для каждого конкретного случая.

Тепловыделением называют количество тепла в калориях на грамм негидратированного цемента, выделяющегося при его полной гидратации при определенной температуре. Наиболее распространенный способ определения тепловыделения заключается в измерении теплоты растворения негидратированного и гидратированного цемента в смеси азотной и фтористоводородной кислот: разница между этими двумя величинами представляет тепловыделение гидратации. Этот метод описан в BS 1370:1947 и аналогичен методу стандарта ASTM C 186—55. Несмотря на то что особых трудностей эти испытания не представляют, необходимо предостеречь карбонизацию негидратированного цемента, так как поглощение 1%  $\text{CO}_2$  приводит к явному снижению тепловыделения на 5,8 кал/г от общего тепловыделения 60—100 кал/г.

Температура, при которой протекает гидратация, сильно влияет на скорость тепловыделения, что показывают данные табл. 1.4.

Строго говоря, суммарное тепловыделение складывается из тепловыделения химической реакции и тепловыделения в результате сорбции воды поверхностью геля, образуемого в процессе гидратации. Теплота сорбции составляет четвертую часть общего тепловыделения.

Для практических целей необходимо знать не общее тепловыделение, а скорость тепловыделения, которую можно легко измерить с помощью адиабатического калориметра. Типичные кривые изменения температуры со временем в адиабатических условиях приведены на рис. 1.8.

Таблица 1.4. Тепловыделение при гидратации цемента в течение 72 ч при различных температурах

Тип цемента	Тепловыделение в кал/г при температуре в °С			
	4,4	23,9	32,2	40
I	36,9	68	73,9	80
III	52,9	83,2	85,3	93,2
IV	25,7	46,6	45,8	51,2

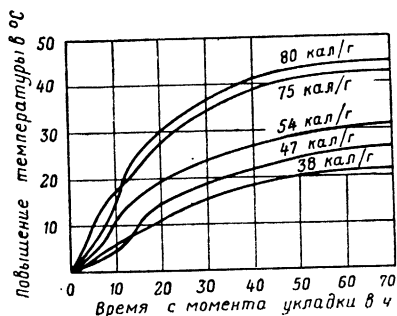


Рис. 1.8. Рост температуры бетонов состава 1 : 2 : 4 с  $B/C=0,60$ , приготовленных на различных цементах и твердших в адиабатических условиях. На графике приведена общая теплота гидратации каждого цемента к 3-суточному возрасту

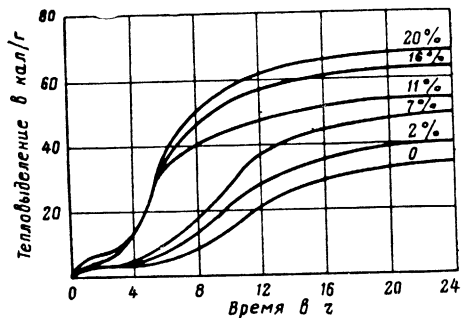


Рис. 1.9. Влияние содержания  $C_3A$  в цементе на тепловыделение (количество  $C_3S$  примерно постоянно)

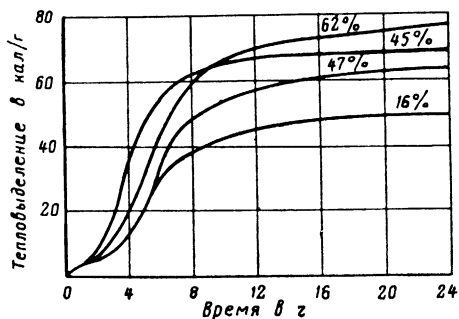


Рис. 1.10. Влияние содержания  $C_3S$  в цементе на тепловыделение (содержание  $C_3A$  примерно постоянно)

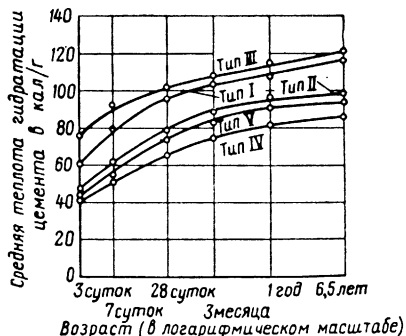


Рис. 1.11. Скорость тепловыделения различных цементов ( $B/C=0,40$ ), твердших при температуре  $21,1^{\circ}C$

Результаты исследований Богга показали, что обычные портландцементы выделяют около половины общего количества теплоты за 1—3 суток, около  $\frac{3}{4}$ — за 7 суток и 83—91% за 6 месяцев. Тепловыделение зависит от химического состава цемента и представляет собой сумму теплот гидратации всех составляющих цемента. Из этого следует, что если известен состав цемента, его тепловыделение может быть определено с высокой степенью точности.

Ниже приведены типичные значения теплоты гидратации чистых клинкерных минералов. Следует отметить, что между тепловыделением и вяжущими свойствами каждого клинкерного минерала зависимости нет.

Составляющие	Тепловыделение в кал/г
$C_3S$ . . . . .	120
$C_2S$ . . . . .	62
$C_3A$ . . . . .	207
$C_4AF$ . . . . .	100

Вудс, Стейнор и Старк провели испытания ряда заводских цементов, и, используя метод наименьших квадратов, рассчитали участие тепловыделения каждого отдельного клинкерного минерала. Они получили уравнение следующего типа: тепловыделение 1 г цемента равно  $136(C_3S) + 62(C_2S) + 200(C_3A) + 30(C_4AF)$ .

Так как в раннем возрасте гидратация отдельных составляющих протекает с различной скоростью, то скорость тепловыделения, так же как и общее количество тепла, зависит от состава цемента. Из этого следует, что снижением процентного содержания наиболее быстро гидратирующихся компонентов ( $C_3A$  и  $C_3S$ ) скорость тепловыделения бетона в раннем возрасте может быть снижена. Тонкость помола цемента также влияет на скорость тепловыделения при гидратации: увеличение тонкости помола ускоряет реакции гидратации и выделение тепла, однако общее количество выделенного тепла не зависит от тонкости помола цемента.

Влияние  $C_3A$  и  $C_3S$  на тепловыделение можно видеть на рис. 1.9 и 1.10. Для многих областей применения бетонов умеренное тепловыделение является положительным фактором и производство соответствующих цементов было организовано. Один из таких цементов — портландцемент с умеренной экзотермией — подробно рассматривается в следующей главе. Скорость тепловыделения этого и других цементов показана на рис. 1.11.

Расход цемента в смеси также будет влиять на общее количество выделяющегося тепла — это может быть использовано для регулирования тепловыделения.



## ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТА

В предшествующих разделах было показано, что тепловыделение цемента является аддитивной функцией его минералогического состава. По-видимому, различные гидраты сохраняют свою идентичность в цементном геле, который можно рассматривать как дисперсную физическую смесь, состоящую из сополимеров гидратов. Дальнейшие подтверждения этого были получены на основе измерения удельной поверхности гидратированных цементов, содержащих различные количества  $C_3S$  и  $C_2S$ . Результаты измерений согласуются с определениями удельной поверхности гидратированных  $C_3S$  и  $C_2S$ . Кроме того, количество воды для гидратации соответствует принципу аддитивности отдельных компонентов.

Этот аргумент, однако, не распространяется на все свойства цементного камня, а именно на усадку, ползучесть и прочность; тем не менее минералогический состав дает некоторое представление об изучаемых свойствах материала. В частности, минералогический состав цемента определяет скорость тепловыделения при гидратации и стойкости цемента к сульфатной коррозии.

Предельно допустимые значения содержания отдельных клинкерных минералов для различных видов цемента приводятся в технических условиях ASTM 150—56 (табл. 1.5).

Таблица 1.5. Предельно допустимое содержание в % отдельных клинкерных минералов в цементах различных типов по ASTM C 150—56

Клинкерные минералы	Тип цемента				
	I	II	III	IV	V
$C_3S$ (максимум) . .	—	50	—	35	50
$C_2S$ (минимум) . .	—	—	—	40	—
$C_3A$ (максимум) . .	—	8	15	7	5

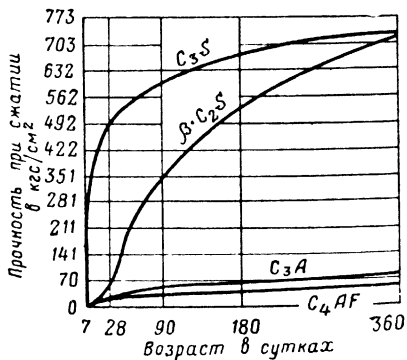


Рис. 1.12. Интенсивность роста прочности отдельных клинкерных минералов при гидратации

О различии в скорости гидратации в раннем возрасте  $C_3S$  и  $C_2S$  — двухсиликатов, в основном обеспечивающих прочность цементного камня, — уже упоминалось ранее. Считают, что рост прочности в течение первых четырех недель обусловлен в основном  $C_3S$ , а рост прочности в последующий период твердения обеспечивается преимущественно  $C_2S$ . В возрасте около года оба эти клинкерных минерала примерно в равной степени оказывают влияние на величину конечной прочности. Было установлено, что прочность цементного камня из  $C_3S$  и  $C_2S$  в возрасте

18 мес. составляет  $703 \text{ кгс/см}^2$ , в возрасте 7 суток  $C_2S$  имеет низкую прочность, в то время как прочность  $C_3S$  — около  $422 \text{ кгс/см}^2$ . Интенсивность роста прочности отдельных клинкерных минералов приведена на рис. 1.12.

Влияние других основных клинкерных минералов на рост прочности цемента недостаточно полно изучено.  $C_3A$  способствует росту прочности цементного камня в возрасте 1—3 суток, но оказывает противоположное влияние в позднем возрасте, особенно в цементах с высоким содержанием  $C_3A$  или ( $C_3A + C_4AF$ ).

Влияние  $C_4AF$  на рост прочности цемента также имеет спорный характер, хотя это влияние и является незначительным. Вероятно, коллоидное гидратированное соединение  $CaO \cdot Fe_2O_3$  осаждается на цементных зернах, что замедляет процесс гидратации других клинкерных минералов.

Зная влияние каждого клинкерного минерала на прочность цемента, можно предсказать прочность цемента на основе его минералогического состава. Это можно выразить в виде следующей формулы:

прочность равна:  $a(C_3S) + b(C_2S) + c(C_3A) + d(C_4AF)$ , где  $a, b, c, d$  — постоянные параметры, характеризующие изменение прочности цементного камня при изменении содержания соответствующего клинкерного минерала на 1%.

Приведенная формула могла бы быть использована для предсказания прочности цемента в процессе его производства, что уменьшило бы потребность в стандартных испытаниях. Практически была изучена только роль силикатов. Влияние

содержания  $C_3S$  на прочность можно видеть из рис. 1.13, на котором приводится прочность стандартного раствора, приготовленного на цементах различного состава на различных заводах.

Оценка влияния других, несиликатных, клинкерных минералов на прочность весьма затруднительна. Согласно Ли, возможные несоответствия объясняются присутствием стекла в клинкере. Другими словами, наблюдаемые отклонения объясняются статистической природой явлений, в которых мы игнорируем влияние некоторых переменных. К тому же есть некоторые признаки, что аддитивность не может быть здесь достаточно полной.

Пауэрс обнаружил, что некоторые продукты образуются на всех стадиях гидратации цементного камня; это следует из того, что для данного цемента поверхность гидратированного цемента пропорциональна количеству связанной воды независимо от  $V/C$  и возраста. Таким образом, степени гидратации каждого компонента в данном цементе одинаковы — это довольно неожиданный вывод, отличающийся от описанных

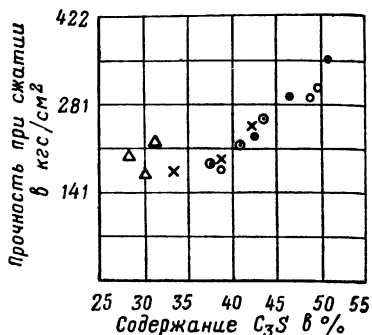


Рис. 1.13. Зависимость прочности цементного камня в возрасте 7 суток от содержания  $C_3S$  в цементе (результаты различных исследователей отмечены разными знаками)

ранее результатов испытаний по определению степени гидратации различных клинкерных минералов.

Если природа продуктов гидратации одинакова в любом возрасте, то тепловыделение на единицу веса гидратированного вещества должно быть постоянным в любом возрасте (рис. 1.14). Это положение выявлено Фербеком и Фостером. Хотя гипотеза о равных частичных скоростях гидратации еще противоречива, в настоящее время полагают, что в пределах лимитированного диапазона составов обычного и быстротвердеющего портландцементов эта гипотеза в основном может быть использована. Однако поведение других цементов с более высоким содержанием  $C_2S$ , чем обычные или быстротвердеющие цементы, не соответствует этой гипотезе. Экспериментальное определение теплоты гидратации показывает, что  $C_3S$  гидратируется раньше, а некоторое количество  $C_2S$  начинает гидратироваться позже.

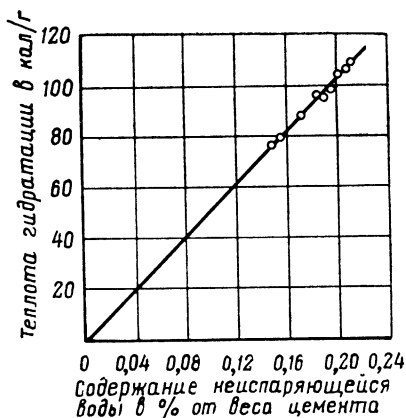


Рис. 1.14. Зависимость между теплотой гидратации и количеством неиспаряющейся воды для портландцемента типа I

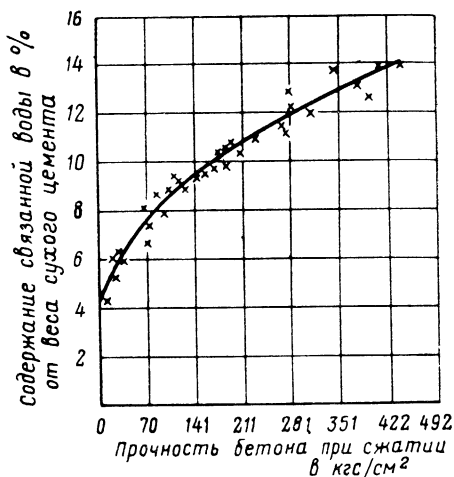


Рис. 1.15. Зависимость между прочностью при сжатии бетона состава 1:2:4 и содержанием связанной воды

Первоначальный каркас цементного камня, возникший во время схватывания, влияет в значительной степени на дальнейшую структуру продуктов гидратации, в особенности на трещиностойкость и интенсивность роста прочности. Следовательно, не удивительно, что существует определенная зависимость между степенью гидратации и прочностью. На рис. 1.15 показана эмпирическая зависимость между прочностью бетона при сжатии и содержанием связанной воды в цементном камне при  $V/C = 0,25$ . Эти данные согласуются с наблюдениями Пауэрс за отношением гель:пространство, согласно которым повышение прочности цементного камня есть функция увеличения относительного объема геля независимо от возраста,  $V/C$  или минералогического

состава цемента. Однако общая величина поверхности твердой фазы связана с минералогическим составом цемента, который влияет на фактическую величину конечной прочности.

Влияние второстепенных составляющих на прочность цементного камня пока недостаточно исследовано, так как считали, что эти составляющие не имеют важного значения для прочности бетона. Предполагают, что  $K_2O$  замещает одну молекулу  $CaO$  в  $C_2S$  с соответствующим повышением содержания  $C_3S$  против расчетного.

Последние данные по изучению влияния щелочей на прочность показали, что рост прочности в возрасте свыше 28 суток зависит от содержания щелочей: чем больше щелочей содержится в цементе, тем меньше прирост прочности. Данных о влиянии щелочей на интенсивность роста прочности цемента в возрасте до 28 суток нет.

Известно, что щелочи взаимодействуют с так называемыми реакционноспособными заполнителями; в этих условиях ограничивают содержание щелочей в цементе до 0,6% (в расчете на  $Na_2O$ ). Такие цементы иногда называют низкощелочными цементами.

Можно видеть, что щелочи — немаловажный компонент цемента, однако данные об их роли недостаточно полны.

В предыдущей главе были рассмотрены свойства портландцемента и было показано, что цементы, различающиеся по химическому составу и физическим характеристикам, приобретают различные свойства в гидратированном состоянии. Таким образом, можно подобрать соответствующие смеси сырьевых материалов для производства цементов с различными заданными свойствами. И действительно, выпускаются несколько видов портландцемента и ряд цементов для специального применения.

### **ВИДЫ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТОВ**

Ниже приведены названия специальных портландцементов в соответствии с английскими и американскими стандартами.

Английское обозначение	Американское обозначение (по ASTM)
Обычный портландцемент	Тип I
Быстротвердеющий портландцемент	Тип III
Особобыстротвердеющий портландцемент	—
Портландцемент с умеренной экзотермией	Тип IV
Модифицированный цемент	Тип II
Сульфатостойкий портландцемент	Тип V
Шлакопортландцемент	Тип IS
Белый портландцемент	—
Пуццолановый портландцемент	Тип IP

Цементы I, IS, IP, II, III выпускают также с воздухововлекающими добавками, такие цементы дополнительно обозначаются буквой А, например тип IA.

Минералогический состав портландцементов различных видов приведен в табл. 2.1.

Многие цементы были разработаны для обеспечения высокой долговечности бетона в различных условиях эксплуатации. Однако пока невозможно только за счет состава цемента решить проблему долговечности бетона: основные механические свойства затвердевшего бетона, такие как прочность, усадка, водопроницаемость, сопротивление вывет-

Таблица 2.1. Минералогический состав портландцементов различных типов

Тип цемента	Значение	Минералогический состав в %								Количество образцов
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaSO <sub>4</sub>	свободная CaO	MgO	потери при прокаливании	
I	Максимальное . . . . .	67	31	14	12	3,4	1,5	3,8	2,3	21
	Минимальное . . . . .	42	8	5	6	2,6	0	0,7	0,6	
	Среднее . . . . .	49	25	12	8	2,9	0,8	2,4	1,2	
II	Максимальное . . . . .	55	39	8	16	3,4	1,8	4,4	2	28
	Минимальное . . . . .	37	19	4	6	2,1	0,1	1,5	0,5	
	Среднее . . . . .	46	29	6	12	2,8	0,6	3	1	
III	Максимальное . . . . .	70	38	17	10	4,6	4,2	4,8	2,7	5
	Минимальное . . . . .	34	0	7	6	2,2	0,1	1	1,1	
	Среднее . . . . .	56	15	12	8	3,9	1,3	2,6	1,9	
IV	Максимальное . . . . .	44	57	7	18	3,5	0,9	4,1	1,9	16
	Минимальное . . . . .	21	34	3	6	2,6	0	1	0,6	
	Среднее . . . . .	30	46	5	13	2,9	0,3	2,7	1	
V	Максимальное . . . . .	54	49	5	15	3,9	0,6	2,3	1,2	22
	Минимальное . . . . .	35	24	1	6	2,4	0,1	0,7	0,8	
	Среднее . . . . .	43	36	4	12	2,7	0,4	1,6	1	

риванию и ползучесть, зависят не только от химико-минералогического состава цемента, но также и от других факторов, хотя состав в значительной степени определяет интенсивность нарастания прочности во времени. На рис. 2.1 показан рост прочности во времени бетонов на портландцементов различных видов, причем в то время как интенсивность роста прочности этих бетонов существенно различается, их предельная прочность практически одинакова для цементов всех видов. Наблюдается следующая общая тенденция: цементы с пониженной скоростью твердения имеют несколько более высокую предельную прочность. Из рис. 2.2 видно, что по сравнению с другими цементами цемент типа IV имеет самую низкую прочность в возрасте 28 суток, однако в возрасте 5 лет он имеет самую высокую прочность. Это согласуется с характером влияния начальной структуры затвердевшего бетона на его предельную прочность: чем медленнее устанавливается структура, тем более плотным является гель и более высокой предельная прочность бетона. Тем не менее существенные различия в основных физических свойствах цементов разных типов обнаруживаются только на начальных стадиях гидратации; в гидратированном цементном камне свойства сближаются.

Деление цемента на виды является довольно широкой классификацией, поэтому иногда могут встречаться значительные различия даже

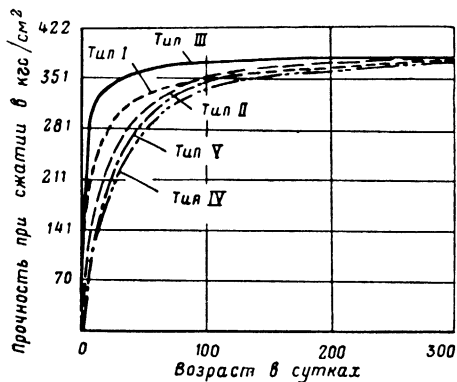


Рис. 2.1. Рост прочности бетонов, приготовленных на цементах различных типов

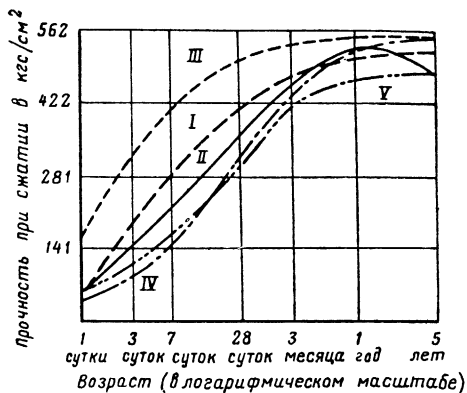


Рис. 2.2. Рост прочности бетонов с  $B/C=0,49$ , приготовленных на цементах различных типов

среди одного и того же вида. С другой стороны, нет резких границ между свойствами цемента разных типов и некоторые из них могут быть отнесены более чем к одному виду.

В решении вопроса о необходимости изготовления цемента, отличающихся по составу и свойствам, следует учитывать и технико-экономический показатель.

### ОБЫЧНЫЙ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ

Наиболее распространенными видами портландцемента являются обычные портландцементы, которые составляют почти 90% (около 11 млн. т в год) от общего количества всех цемента, применяемых в Англии.

Использование обычного портландцемента (тип I) целесообразно в тех бетонных конструкциях, которые не подвергаются агрессивному воздействию сульфатов, содержащихся в грунтовых или подземных водах. Технические условия на обычный портландцемент приводятся в BS 12:1958\*. Химический состав портландцемента должен быть таким, чтобы коэффициент насыщения известью находился в пределах 0,66—1,02.

Коэффициент насыщения известью определяется по формуле

$$\frac{(CaO) - 0,7(SO_3)}{2,8(SiO_2) + 1,2(Al_2O_3) + 0,65(Fe_2O_3)}$$

\* В СССР действует ГОСТ 10178—62 на портландцемент и его разновидности. (Прим. ред.)

Ограничение максимального значения коэффициента насыщения известно необходимо для того, чтобы количество извести в клинкере было недостаточным для образования при температуре обжига свободной окиси кальция. Несмотря на важное значение равномерного изменения объема цемента при твердении, стандарт ASTM и многие европейские технические условия на цементы не содержат показателя, ограничивающего содержание свободной окиси кальция.

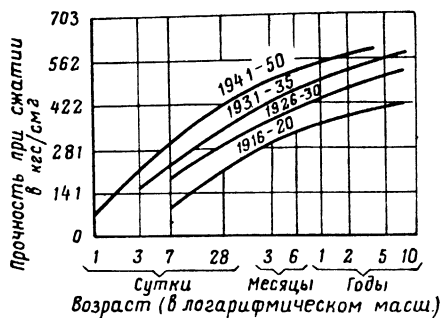


Рис. 2.3. Интенсивность роста прочности цементов производства 1916—1950 гг. по результатам испытаний стандартных бетонных цилиндров с  $V/C=0,53$

характеризуются повышенным содержанием  $C_3S$  и более высокой тонкостью помола, чем цементы, которые производили 30 лет назад. В настоящее время цементы обладают более высокой прочностью в возрасте 28 суток, однако рост прочности (рис. 2.3) в интервале между 28 сутками и 10 годами остался без изменения и составляет примерно  $210 \text{ кгс/см}^2$  для бетона с  $V/C=0,53$ , твердеющего в водных условиях.

### БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИЙ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ

Этот цемент аналогичен обычному портландцементу: на него распространяются требования BS 12:1958. Быстротвердеющий портландцемент (тип III), как видно из его названия, ускоренно набирает прочность и, следовательно, его можно более правильно охарактеризовать как цемент с повышенной прочностью в раннем возрасте. Скорость твердения не следует смешивать со скоростью схватывания, так как в действительности как обычный, так и быстротвердеющий портландцемент характеризуется примерно одинаковыми сроками схватывания.

Быстротвердеющий портландцемент в 3-суточном возрасте дает прочность, равную 7-суточной прочности обыкновенного портландцемента при том же  $V/C$ . В соответствии с BS 12:1958 прочность быстротвердеющего портландцемента должна быть не меньше значений, приведенных в BS 12:1958. Большая интенсивность роста прочности быстротвердеющего цемента достигается повышенным содержанием  $C_3S$  и более тонким помолом цементного клинкера. В соответствии

Кроме того, в соответствии с требованиями BS 12:1958 к химическому составу обычного портландцемента содержание окиси магния не должно превышать 4% и отношение  $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$  не должно быть менее 0,66. Количество нерастворимого остатка не должно превышать 1,5%. Потеря при прокаливании ограничивается 3% при умеренном климате и 4% при тропическом климате. Максимальное содержание гипса также ограничивается.

Со временем в составе и свойствах обычного портландцемента произошли некоторые изменения. В частности, современные цементы



с BS 12:1958 минимальная удельная поверхность составляет  $3250 \text{ см}^2/\text{г}$ , но, как правило, удельная поверхность быстротвердеющих портландцементов значительно выше.

Выпускаемый в Англии обычный портландцемент имеет удельную поверхность, превышающую  $2250 \text{ см}^2/\text{г}$ , требуемую BS 12:1958. Многие заводы выпускают обычный портландцемент с повышенным содержанием  $\text{C}_3\text{S}$ , поэтому на практике иногда существуют небольшие различия между быстротвердеющим и некоторыми обычными портландцементами, однако это не может считаться за правило.

Требования, предъявляемые к равномерности изменения объема при твердении и химическому составу, одинаковы как к быстротвердеющему, так и к обычному портландцементу.

Применение быстротвердеющего цемента целесообразно там, где желателен быстрый рост прочности. Например, когда необходимо быстрее освободить формы и подготовить их для повторного использования или когда для дальнейшего строительства требуется максимально быстро достигнуть требуемой прочности. Быстротвердеющий цемент лишь на 10 шиллингов за 1 т дороже обычного цемента, и не удивительно, что быстротвердеющий цемент находит широкое распространение и что его производство в Англии составляет примерно 10% общего количества выпускаемого цемента. Однако, поскольку высокая интенсивность роста прочности сопровождается и высокой скоростью тепловыделения, быстротвердеющий портландцемент не следует применять в массивных сооружениях и конструкциях. С другой стороны, применение цемента с высокой скоростью тепловыделения при строительстве в условиях низких температур может обеспечить удовлетворительную стойкость к воздействию мороза в раннем возрасте.

Особой разновидностью быстротвердеющего портландцемента является «ускоренный» цемент, выпускаемый в Бельгии и вводимый теперь в Англии. Этот цемент характеризуется чрезвычайно тонким помолом, остатком 0,5% на сите № 170, удельной поверхностью  $4500\text{—}5000 \text{ см}^2/\text{г}$ ; он не содержит ни ускорителей, ни добавок. Стандартные испытания кубов из вибрированного раствора показали, что в суточном возрасте достигается прочность  $280 \text{ кгс}/\text{см}^2$ , через 3 суток —  $490 \text{ кгс}/\text{см}^2$  и через 28 суток —  $670 \text{ кгс}/\text{см}^2$ . Такое быстрое нарастание прочности позволяет использовать ускоренный цемент для зимнего бетонирования или проведения аварийных работ, например ремонта автомобильных дорог, тампонирувания скважин и т. д.

В некоторых странах, например Италии и Швеции, цемент с чрезвычайно высокой прочностью в раннем возрасте производят двойным обжигом в печи.

#### **ОСОБОБЫСТРОТВЕРДЕЮЩИЙ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ**

Этот цемент получают совместным помолом клинкера быстротвердеющего портландцемента и хлористого кальция. Количество хлористого кальция не должно превышать 2%. Поскольку хлористый кальций является гигроскопическим веществом, особобыстротвердеющий цемент

необходимо хранить в сухих условиях и использовать в течение месяца с момента его изготовления.

Применение особобыстротвердеющего цемента является особенно целесообразным при бетонировании в холодных условиях, а также в тех случаях, когда требуется очень высокая прочность в раннем возрасте, а использование глиноземистого цемента является нежелательным. Прочность особобыстротвердеющего цемента выше, чем быстротвердеющего цемента, примерно на 25% в возрасте 1—2 суток и на 10—20% в возрасте 7 суток. Сроки схватывания особобыстротвердеющего цемента меньше нормальных: в зависимости от температуры они колеблются от 5 до 30 мин; поэтому укладку бетона на этом цементе необходимо проводить в максимально короткие сроки. Усадка особобыстротвердеющего портландцемента значительно превышает усадку быстротвердеющего портландцемента. При отсутствии особобыстротвердеющего цемента можно использовать быстротвердеющий портландцемент, скорость твердения которого повышают путем добавки в его состав хлористого кальция непосредственно перед перемешиванием бетонной смеси. В этом случае хлористый кальций можно рассматривать как ускоритель; его влияние на свойства цемента рассмотрено ниже<sup>1</sup>.

#### ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ С УМЕРЕННОЙ ЭКЗОТЕРМИЕЙ

Возрастание температуры внутри массивных бетонных сооружений в результате тепловыделения при гидратации цемента может привести к образованию трещин. Поэтому в массивных конструкциях необходимо применять цементы с пониженной скоростью тепловыделения: в этом случае большая часть тепла может рассеяться и подъем температуры будет меньшим.

Цемент с пониженной скоростью тепловыделения был впервые получен в США для использования в больших гравитационных плотинах и известен как портландцемент с умеренной экзотермией (цемент типа IV).

По BS 1370:1958 теплота гидратации этого цемента должна быть к 7 суткам не более 60 кал/г и к 28 суткам не более 70 кал/г.

Содержание окиси кальция с учетом извести, связанной с SO<sub>3</sub>, должно удовлетворять следующим условиям:

$$\frac{\text{CaO}}{2,4 (\text{SiO}_2) + 1,2 (\text{Al}_2\text{O}_3) + 0,65 (\text{Fe}_2\text{O}_3)} \leq 1$$

и

$$\frac{\text{CaO}}{1,9 (\text{SiO}_2) + 1,2 (\text{Al}_2\text{O}_3) + 0,65 (\text{Fe}_2\text{O}_3)} \geq 1.$$

<sup>1</sup> Возможность применения хлористого кальция как ускорителя твердения определяется видом железобетонных конструкций и условиями их работы. Не допускается применение хлористого кальция в конструкциях с предварительно напряженной арматурой, в конструкциях, работающих в условиях попеременного увлажнения и высушивания, и в ряде других случаев. (Прим. ред.)

Пониженное содержание наиболее быстро гидратирующихся клинкерных минералов  $C_3S$  и  $C_3A$  приводит к замедленному нарастанию прочности цемента с умеренной экзотермией по сравнению с обычным портландцементом, однако на конечную величину прочности оно не оказывает влияния. В любом случае для обеспечения достаточной интенсивности нарастания прочности удельная поверхность цемента должна быть не менее  $3200 \text{ см}^2/\text{г}$ .

В ряде случаев пониженная прочность в раннем возрасте может быть существенным недостатком, и поэтому в США был разработан новый тип цемента, так называемый модифицированный цемент (тип II), характеризующийся несколько более высокой скоростью тепловыделения по сравнению с цементом с умеренной экзотермией, однако интенсивность нарастания его прочности такая же, как у обычного портландцемента. Модифицированный цемент рекомендуют применять в конструкциях, для которых требуется пониженное тепловыделение и повышенная сульфатостойкость, например в слабоминерализованной воде, а также в условиях умеренной сульфатной агрессивности среды. Модифицированный цемент широко применяется в США. На модифицированный цемент (тип II) и цемент с умеренной экзотермией (тип IV) распространяются технические условия ASTM C 150—56.

#### СУЛЬФАТОСТОЙКИЙ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ

При рассмотрении реакций гидратации цемента и, в частности, процесса твердения было упомянуто о реакции между  $C_3A$  и гипсом ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) и соответствующем образовании сульфоалюмината кальция. Аналогичным образом в цементном камне гидроалюминат кальция может взаимодействовать с сульфатами, содержащимися в окружающей бетон среде, при этом образуется гидросульфоалюминат кальция, кристаллизующийся в структуре затвердевшего цементного камня. Увеличение объема твердой фазы цементного камня происходит на 227%, что приводит к постепенному разрушению бетона. Вторым типом протекающей реакции является обменная реакция между гидратом окиси кальция и сульфатами, которая приводит к образованию гипса с возрастанием объема твердой фазы на 124%.

Эти реакции характеризуют сульфатную агрессию. Наиболее агрессивными солями являются сульфаты магния и натрия. Сульфатная агрессия значительно усиливается, если она сопровождается попеременным увлажнением и высыханием бетона, как это бывает, например, в морских сооружениях при приливах и отливах воды.

Средство защиты бетона от сульфатной коррозии заключается в применении цемента с низким содержанием  $C_3A$ . Такой цемент известен как сульфатостойкий портландцемент.

Специального Британского стандарта для этого цемента не существует, и считают, что он должен отвечать требованиям BS 12:1958 на обычный портландцемент. В США сульфатостойкий цемент, известный под названием «цемент типа V», должен отвечать требованиям Технических условий ASTM C 150—56. В соответствии с Техническими условиями

ми содержание  $C_3A$  в нем не должно превышать 5%, а общее содержание  $C_4AF$  плюс удвоенное содержание  $C_3A$  не должно превышать 20%. Содержание окиси магния ограничивается 4%.

Влияние  $C_4AF$  недостаточно изучено. С химической точки зрения полагают, что  $C_4AF$  способствует образованию сульфоалюмината кальция, а также сульфоферрита кальция и таким образом вызывает расширение цементного камня. Представляется, однако, что воздействие сульфата кальция на цементный камень тем меньше, чем ниже отношение  $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$ . В результате реакций образуется ряд твердых растворов, сравнительно мало подверженных коррозии. Четырехкальциевый феррит характеризуется даже повышенной стойкостью к коррозии и может образовывать защитные пленки над свободными алюминатами кальция. В тех случаях, когда представляется невозможным снизить содержание  $Al_2O_3$  в сырьевых материалах, к смеси может быть добавлена  $Fe_2O_3$ , что приводит к увеличению содержания  $C_4AF$  за счет уменьшения  $C_3A$ .

Примером цемента с весьма низким отношением  $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$  является цемент «Феррари», в производстве которого часть глинистого компонента сырьевой смеси заменяют окисью железа. Аналогичный цемент производится в ФРГ под названием «цемент ERZ» — железорудный цемент. Низкое содержание  $C_3A$  и пониженное содержание  $C_4AF$  в сульфатостойком цементе означает, что этот цемент содержит значительное количество силикатов и соответственно характеризуется высокой конечной прочностью, однако, так как значительную часть силикатов представляет  $C_2S$ , то прочность этого цемента в раннем возрасте довольно низкая. Тепловыделение сульфатостойкого цемента не намного выше, чем цемента с умеренной экзотермией. Таким образом, можно считать, что сульфатостойкий цемент теоретически является идеальным цементом, однако, учитывая специальные требования, предъявляемые к составу сырьевых материалов, производство сульфатостойкого цемента является довольно трудоемким и сравнительно дорогостоящим.

## ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТ

Этот тип цемента получают совместным помолом портландцементного клинкера и гранулированного доменного шлака. В соответствии с BS 146:1947 количество шлака не должно превышать 65% веса цемента.

Шлак является побочным продуктом, получаемым при выплавке чугуна в доменных печах, при этом количество образующегося шлака примерно равно количеству выплавленного чугуна. Шлак представляет собой в основном смесь соединений кальция, кремния и алюминия. Эти же окислы входят в состав портландцемента, однако в несколько иных соотношениях между собой.

Доменные шлаки значительно различаются по своему составу и структуре, которые определяются типом технологического производственного процесса выплавки чугуна и способом охлаждения шлака.

Шлак, используемый для производства шлакопортландцемента, должен быть быстроохлажденным, так как в этом случае он при затвердевании приобретает стекловидную структуру. В результате быстрого охлаждения в воде шлаки приобретают мелкозернистую структуру.

Для получения вяжущих веществ шлаки используют различными путями. Во-первых, они могут быть использованы вместе с известняком в качестве сырьевого материала при общепринятом способе производства портландцемента. Клинкер, полученный из этих сырьевых материалов, часто применяют путем последующего смешивания со шлаком для производства шлакопортландцемента. Получение шлакопортландцемента является вторым основным направлением использования шлака. Сухой гранулированный шлак вместе с портландцементным клинкером измельчают в мельницах, куда для регулирования сроков схватывания добавляется также гипс.

Шлакопортландцемент в течение многих лет уже производится в Шотландии. В США шлакопортландцемент, известный под названием «цемент типа I S», должен соответствовать требованиям Временных технических условий ASTM C 205—58T.

В ФРГ выпускают шлакопортландцемент под названием «железопортландцемент» (до 30% шлака) и «доменный цемент» (31—85% шлака). Во Франции наиболее распространенными шлакопортландцементами являются смешанный металлургический цемент, содержащий 50% шлака, и доменный цемент, содержащий 65—75% шлака. Бельгийский способ получения шлакопортландцемента («процесс Триф») предусматривает мокрый помол шлаков и последующее смешивание шлакового шлама в бетономешалке с портландцементом и заполнителями. В этом случае исключаются затраты на высушивание шлака. Кроме того, при одинаковом расходе электроэнергии мокрый помол позволяет получить шлак с большей удельной поверхностью по сравнению с сухим способом помола.

Фактическая природа твердения шлакопортландцемента еще недостаточно раскрыта. Минералы портландцементного клинкера в составе шлакопортландцемента гидратируются обычным путем с образованием гидрата окиси кальция, являющегося активизатором твердения гранулированного шлака. Однако последующая гидратация шлака не находится в прямой зависимости от его взаимодействия с известью. По

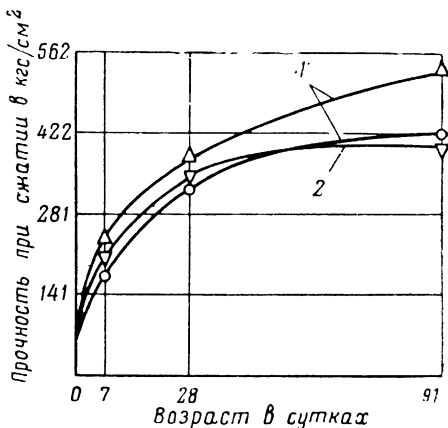


Рис. 2.4. Рост прочности во времени бетонов на шлакопортландцементе ( $V/C=0,6$ )

1 — шлакопортландцемент; 2 — обычный портландцемент

своим свойствам шлакопортландцемент во многом аналогичен обычному портландцементу. Требования, предъявляемые к шлакопортландцементу BS 146:1947, по тонкости помола, срокам схватывания, равномерности изменения объема при твердении и прочности те же, что для портландцемента. В действительности, у шлакопортландцемента тонкость помола несколько выше, а интенсивность твердения несколько ниже, чем у портландцемента в течение первых 28 суток. Однако в более поздние сроки различия в прочности шлакопортландцемента и обычного портландцемента невелики. На рис. 2.4 приведены характерные кривые роста прочности цементов во времени. Тепловыделение шлакопортландцемента ниже, чем у обычного портландцемента, поэтому первый может быть использован в массивных бетонных конструкциях. Пониженное тепловыделение при твердении наряду с замедленной интенсивностью нарастания прочности шлакопортландцемента препятствует его использованию в зимних условиях. Благодаря своей повышенной стойкости против действия минерализованных вод шлакопортландцемент часто используют при строительстве морских сооружений.

### СУЛЬФАТНО-ШЛАКОВЫЙ ЦЕМЕНТ

Сульфатно-шлаковый цемент получают путем совместного тонкого помола смеси из 80—85% гранулированного шлака с 10—15% сульфата кальция (в виде обожженного гипса или ангидрита) и 5% портландцементного клинкера. Удельная поверхность цемента составляет 4000—5000  $см^2/г$ .

Сульфатно-шлаковый цемент широко распространен в Бельгии, где он известен под названием «сульфатированный шлаковый цемент», а также во Франции и ФРГ (под названием «сульфатхюттен-цемент»). Недавно сульфатно-шлаковый цемент начали применять в Англии. Он характеризуется высокой стойкостью к действию морской воды и может противостоять действию грунтовых и подземных вод с высокой концентрацией сульфатов, а также стойкостью к торфяным кислотам и маслам. Поэтому сульфатно-шлаковый цемент применяют при строительстве канализационных и сточных сооружений и конструкций, эксплуатируемых в загрязненном грунте. Недавно были высказаны предположения, что этот цемент является менее стойким к сульфатной агрессии при концентрации сульфатов более 1%, чем сульфатостойкий портландцемент.

Сульфатно-шлаковый цемент характеризуется пониженным тепловыделением, составляющим к 7 суткам 40—45  $ккал/г$  и к 28 суткам 45—50  $ккал/г$ . Следовательно, этот цемент целесообразно применять для массивных бетонных сооружений. Скорость твердения сульфатно-шлакового цемента возрастает при повышении температуры до 38°С, однако при более высоких температурах наблюдается аномальное поведение цемента: его прочность значительно падает. Поэтому тепловлажностная обработка для этих цементов недопустима. Следует также отметить, что сульфатно-шлаковый цемент не следует применять в смеси с другими типами цемента. Весьма важным является выдерживание бетонов на этом цементе во влажных условиях в течение не менее 3 суток после бетонирования, так как в результате преждевременного высыхания

происходит разрыхление поверхностного слоя, однако глубина этого слоя со временем не увеличивается.

Сульфатно-шлаковый цемент химически связывает при гидратации больше воды, чем портландцемент, поэтому бетонная смесь должна характеризоваться водоцементным отношением не менее чем 0,5. Применение смесей более тощих по составу, чем 1 : 6, не рекомендуется. Как уже было отмечено, снижение прочности с увеличением водоцементного отношения для сульфатно-шлакового цемента меньше, чем для других типов цемента. Так как интенсивность роста прочности в раннем возрасте зависит от типа шлака, использованного для получения цемента, желательно определить фактические прочностные характеристики цемента перед его применением. Значения прочности этого цемента приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Характерное значение прочности сульфатно-шлакового цемента

Возраст	Предел прочности при сжатии в кгс/см <sup>2</sup>	
	стандартный вибрированный раствор	бетон по стандарту
1 сутки	70	49—105
3 суток	281	176—281
7 »	351—492	281—351
28 »	386—667	386—457
6 месяцев	—	527

## ПУЦЦОЛАНОВЫЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТЫ

Пуццолановыми портландцементами называют тонкоизмельченные и тщательно перемешанные смеси портландцемента и активной минеральной добавки. Активные минеральные добавки — это искусственные или природные вещества, содержащие в своем составе активный кремнезем. Активная минеральная добавка должна быть в тонкоизмельченном состоянии, так как только в этом виде активный кремнезем может вступать в водной среде в химическое взаимодействие с гидратом окиси кальция — продуктом гидратации портландцемента, образуя устойчивые, обладающие гидравлическими свойствами, силикаты кальция. К числу наиболее широко применяемых активных минеральных добавок относятся вулканический пепел, пемза, опаловые сланцы и кремнистые сланцы, диатомит, обожженные глины, зола и т. д.

Интенсивность нарастания прочности пуццолановых портландцементов зависит от активности минеральных добавок и количества портландцемента в смеси. Как правило, пуццолановые портландцементы характеризуются замедленным нарастанием прочности во времени и требуют влажных условий твердения в течение сравнительно длительного периода, однако конечная прочность пуццоланового и обычного портландцемента примерно одинакова. Характерная кривая нарастания прочности во времени представлена на рис. 2.5.

По Временным техническим условиям ASTM C 340—58T на цемент типа 1P (так обозначают в США пуццолановый портландцемент) содержание активных минеральных добавок в этом цементе должно составлять от 15 до 50% веса цемента. В этих Технических условиях описан также метод определения химической активности минеральных добавок.

Многие активные минеральные добавки дешевле, чем портландцемент, но главное преимущество пуццолановых портландцементов заклю-

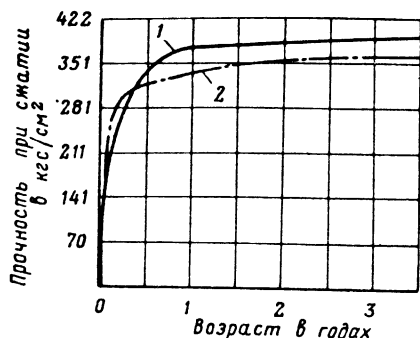


Рис. 2.5. Рост прочности во времени бетонов на портландцементе с золой и обычном портландцементе

1 — бетон на пуццолановом цементе с золой; 2 — бетон на обычном портландцементе

чается в их замедленной гидратации и, следовательно, пониженном тепловыделении. Пуццолановые портландцементы наиболее часто применяются при бетонировании массивных конструкций, для которых указанное свойство цемента является весьма важным достоинством.

Пуццолановые портландцементы характеризуются также повышенной стойкостью к отдельным видам коррозии и, в частности, к сульфатной коррозии. Желательно, чтобы минеральные добавки были предварительно испытаны с теми цементами и заполнителями, которые предполагается использовать в конкретных конструкциях. Активные минеральные добавки также используют для частичной замены цемента,

для частичной замены цемента, для частичной замены цемента,

для частичной замены цемента,

## БЕЛЫЙ ЦЕМЕНТ

В архитектурно-декоративных целях иногда требуется применение отдельных бетонов на основе белых или цветных цементов, что особенно актуально для тропических стран. Белые цементы целесообразно применять с соответствующими заполнителями. Достоинство этих цементов заключается и в том, что в результате низкого содержания растворимых щелочей они характеризуются повышенной атмосферостойкостью.

Сырьевыми материалами для производства белого портландцемента являются каолин и мел (или известняки), отличающиеся ограниченным содержанием красящих окислов — окислов железа и марганца. В качестве топлива в печах применяют нефтепродукты, что позволяет исключить загрязнение клинкера угольной золой. Так как железо образует минералы-плавни, его отсутствие обуславливает необходимость повышения температуры обжига. В ряде случаев в качестве минерала-плавня в шихту добавляют криолит.

При помоле сырьевой шихты и клинкера необходимо исключить их загрязнение примесями металлического железа. Поэтому для помола



вместо обычных металлических шаров применяют неметаллические мелющие тела (гравий). Также применяются мелющие тела, изготовленные из никелевых и молибденовых сплавов. Это удорожает помол, что наряду с использованием более дорогих сырьевых материалов делает белый цемент довольно дорогим материалом.

Бетон на белом цементе часто применяют для облицовки поверхностей из обычного бетона, при этом особое внимание необходимо уделять обеспечению надежного сцепления между обоими бетонами. Для получения надлежащего цвета бетон на белом цементе обычно готовят из жирных бетонных смесей с водоцементным отношением не более 0,4.

При получении бетонов светлых тонов белый цемент может быть использован в качестве основы таких бетонов. Пигменты могут быть добавлены непосредственно в бетономешалку, однако важно, чтобы они не оказали отрицательного воздействия на интенсивность роста прочности бетона. Способ введения пигментов при перемешивании бетонной смеси неудобен, так как в этом случае довольно трудно поддерживать однородность цвета бетона.

Лучший способ получения однородного и долговечного цветного бетона — применение цветного цемента, который получают путем совместного тонкого измельчения белого цементного клинкера с 2—10% пигмента. Применение цветного цемента определяется техническими условиями, разработанными отдельными производителями этого типа цемента. Технические условия на пигменты приведены в BS 1014: 1961. Поскольку пигменты не обладают вяжущими свойствами, следует применять более жирные бетонные смеси, чем обычно. Типичный минералогический состав белого портландцемента следующий (в %):  $C_3S$ —51;  $C_2S$ —26;  $C_3A$ —11;  $C_4AF$ —1;  $SO_3$ —2,6; щелочи—0,25, хотя содержание  $C_3S$  и  $C_2S$  может меняться в значительной мере. Удельный вес белого цемента ниже, чем у обычного портландцемента, и составляет 3,05—3,10 г/см<sup>3</sup>. Прочность белого портландцемента, как правило, несколько ниже, чем у обычного портландцемента, но тем не менее белый цемент должен удовлетворять требованиям BS 12: 1958. Существует также белый глиноземистый цемент, его свойства рассматриваются несколько ниже.

### ПРОЧИЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТЫ

Среди многих специальных цементов представляет интерес цемент для защиты от бактериологических воздействий — противобактериальный цемент, получаемый совместным тонким измельчением портландцементного клинкера с противобактериальной добавкой, которая препятствует микробиологической ферментации. Бактериологическому воздействию подвергаются бетонные полы фабрик пищевой промышленности, где выщелачивание цемента кислотами сопровождается ферментацией, вызываемой бактериями в присутствии влаги. Противобактериальный цемент может быть также успешно использован в плавательных бассейнах, общественных банях и других местах, где возможно присутствие бактерий или плесени.

Еще одним типом специального цемента является так называемый гидробоупный цемент, который сохраняет свои свойства при длительном

хранении в неблагоприятных условиях. Гидрофобный цемент получают совместным тонким измельчением портландцементного клинкера и олеиновой кислоты в количестве 0,1—0,4 \*. В качестве гидрофобизирующей добавки могут быть также использованы стеариновая кислота или пентахлорфенол. Эти добавки создают лучшие условия для помола клинкера, чему, возможно, способствуют электростатические силы, возникающие в результате полярной ориентации молекул кислоты на поверхности цементных частиц.

Олеиновая кислота взаимодействует с щелочами цемента с образованием вспенивающих продуктов — олеатов кальция и натрия, что создает воздухововлечение. При помоле клинкера целесообразно добавлять трибутилфосфат, если воздухововлечение нежелательно.

Гидрофобные свойства цемента объясняются образованием водоотталкивающих пленок на поверхности цементных зерен. При перемешивании бетонной смеси эти пленки снимаются и происходит нормальная гидратация цемента. Однако прочность этого цемента в раннем возрасте понижена.

Гидрофобный цемент аналогичен по внешнему виду обычному портландцементу, он имеет характерный запах плесени. При транспортировании этот цемент кажется более подвижным, чем портландцемент.

Гидрофобные цементы не следует отождествлять с гидроизоляционными цементами, назначение которых — придать бетону водонепроницаемость. Имеются различные мнения об эффективности применения водонепроницаемых цементов.

Кладочные цементы, применяемые для приготовления строительных растворов для каменной кладки, получают совместным тонким измельчением портландцементного клинкера, известняка и воздухововлекающей добавки или портландцементного клинкера, гашеной извести, гранулированного доменного шлака или инертного заполнителя и воздухововлекающей добавки. Строительные растворы на кладочных цементах характеризуются большей пластичностью, водоудерживающей способностью и меньшей усадкой, чем на портландцементе. Прочность кладочного цемента ниже, чем у обычного портландцемента, но это не является недостатком при применении цемента для каменной кладки.

## Романцемент

Так называют природные цементы, получаемые тонким измельчением обожженных известняковых мергелей, содержащих около 25% глинистых примесей. Этот цемент занимает промежуточное положение между портландцементом и гидравлической известью.

Так как температура обжига значительно ниже температуры спекания, романцемент не содержит практически  $C_3S$  и, следовательно, характеризуется замедленным твердением. Различные романцементы в значительной мере отличаются друг от друга по своим свойствам, так как

---

\* Гидрофобный цемент, впервые предложенный в СССР М. И. Хигеровичем и Б. Г. Скрамтаевым, производится путем совместного помола цементного клинкера с добавкой гипса и 0,1—0,3% мылонафта [31]. (Прим. ред.)

корректировка их состава путем добавки тех или иных недостающих компонентов не производится. По этой причине, а также по ряду экономических причин романцементы в настоящее время производятся в незначительных количествах. В США производство романцемента составляет не более 1% общего производства портландцементов.

### Расширяющиеся цементы

Во многих случаях является желательным применение цемента, который не уменьшал бы свой объем в результате усадочных деформаций или даже в особых случаях расширялся при твердении.

Во Франции цементы этого типа разработаны Лосье, который использовал смесь портландцемента, расширяющегося компонента и стабилизатора<sup>1</sup>.

Расширяющийся компонент получают обжигом смеси гипса, бокситов и мела, в результате образуются сульфат кальция и алюминат кальция (в основном  $C_5A_3$ ). В присутствии воды эти компоненты взаимодействуют друг с другом с образованием гидросульфоалюмината кальция, что сопровождается расширением цементного камня. Стабилизатор, в качестве которого применяют доменный гранулированный шлак, медленно нейтрализует избыток сульфата кальция и способствует постепенному прекращению расширения. Для получения требуемой величины расширения необходимо очень тщательно выдерживать соотношение между отдельными составляющими цемента. Обычно примерно 8—20% весовых частей сульфоалюминатного клинкера перемешивают со 100 весовыми частями портландцемента и 15 частями стабилизатора.

Так как расширение цемента происходит только во влажных условиях, уход за бетоном в период твердения должен тщательно контролироваться, а использование расширяющегося цемента требует мастерства и опыта.

Строго говоря, использование расширяющегося цемента в бетоне не делает бетон безусадочным, так как усадка имеет место после того, как влажностное твердение уже прекратилось, но величина расширения может быть установлена такой, чтобы расширение и последующая усадка были одинаковыми.

Другой тип расширяющегося цемента, так называемый высокоактивный расширяющийся цемент, получают совместным помолом портландцементного клинкера, клинкера глиноземистого цемента и гипса в соотношении 65:20:15. Расширение происходит благодаря образованию гидросульфоалюмината кальция, как в цементе Лосье, и развивается в течение 2—3 суток после затворения цемента водой.

Высокоактивный расширяющийся цемент является быстросхватывающимся и быстротвердеющим вяжущим, достигающим прочности свыше 70 кгс/см<sup>2</sup> через 6 ч и 490 кгс/см<sup>2</sup> через 28 суток. Цемент характеризуется высокой стойкостью к сульфатной коррозии.

<sup>1</sup> Расширяющиеся цементы и бетоны на них разработаны в СССР В. В. Михайловым, И. В. Кравченко [32, 33] на основе смеси глиноземистого цемента и расширяющегося компонента, получаемого из глиноземистого цемента и гипса. (Прим. ред.)

Расширяющиеся цементы применяют в довольно ограниченном масштабе, и прежде, чем они найдут более широкое распространение, необходимо дальнейшее усовершенствование этих цементов.

### Глиноземистый цемент

В начале этого столетия исследование способов защиты бетонных конструкций на портландцементе от действия вод, содержащих гипс, привело Жюля Биду во Франции к открытию глиноземистого цемента. По своему составу и некоторым свойствам этот цемент значительно отличается от портландцемента, но техника бетонирования такая же.

В состав цемента входит примерно 40% окиси алюминия (глинозема), 40% окиси кальция, до 5% двуокиси кремния (кремнезема), а также некоторое количество окислов железа.

Следует отметить, что производство глиноземистого цемента отличается от получения портландцемента тем, что сырьевая шихта в первом случае полностью расплавляется в печи. Поэтому во Франции один из видов глиноземистого цемента получил название «плавленный цемент». Это же торговое название цемента распространено теперь и в Англии. Глиноземистый цемент выпускается также под другими фирменными названиями, например, «Лайтнинг-цемент» (Англия) и «люмнит» (США).

### Химико-минералогический состав

Химический состав глиноземистого цемента, выпускаемого в Англии, характеризуется содержанием следующих окислов (в %):  $\text{SiO}_2$  — 3,5—5,5;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 37—41;  $\text{CaO}$  — 35—39;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 9—10;  $\text{FeO}$  — 5—6;  $\text{TiO}_2$  — 1,5—2;  $\text{MgO}$  — 1; нерастворимый остаток — 1. В соответствии с BS 915:1947 минимальное содержание глинозема должно составлять 32%, а отношение глинозем:известь — 0,85—1,3. Минералогический состав глиноземистого цемента изучен значительно меньше, чем состав портландцемента. Основными минералами глиноземистого цемента являются низкоосновные алюминаты кальция:  $\text{CA}$  и  $\text{C}_5\text{A}_3$ . В настоящее время считают, что состав последнего точнее характеризуется формулой  $\text{C}_{12}\text{A}_7$ . В цементе также содержатся следующие соединения:  $\text{C}_6\text{A}_4 \cdot \text{FeO} \cdot \text{S}$  и изоморфический  $\text{C}_6 \cdot \text{A}_4 \cdot \text{MgO} \cdot \text{S}$ . Количество  $\text{C}_2\text{S}$  или  $\text{C}_2\text{AS}$  в глиноземистом цементе составляет несколько процентов. В небольшом количестве присутствуют и некоторые другие компоненты. В глиноземистом цементе свободная известь отсутствует, поэтому определение равномерности изменения объема цемента при твердении не является важным для глиноземистых цементов, хотя BS 915:1947 предусмотрено проведение стандартных испытаний по методу Ле Шателье.

### Гидратация

Однокальциевый алюминат характеризуется повышенной интенсивностью роста прочности. Его гидратация происходит с образованием  $\text{CAH}_{10}$ , небольшого количества  $\text{C}_2\text{AH}_8$  и глиноземистого геля ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot a\text{q}$ ).

Со временем эти гексагональные гидраты, неустойчивые как при нормальных, так и при повышенных температурах, переходят в кубические кристаллы  $C_3AH_6$  и гель гидрата окиси алюминия. Процесс перекристаллизации ускоряется при повышении температуры и концентрации извести или возрастании щелочности в растворе.

Полагают, что продуктом гидратации  $C_5A_3$  является  $C_2AH_8$ , а продуктом гидратации  $C_2S$  будет  $CSH$ . Известь, образованная при гидролизе, взаимодействует с избытком глинозема, поэтому  $Ca(OH)_2$  отсутствует среди продуктов гидратации. Реакции гидратации прочих составляющих, в частности железосодержащих соединений, пока еще недостаточно изучены, однако известно, что железо в составе стекла является инертным компонентом.

Для полной гидратации глиноземистого цемента необходимо 50% воды от веса сухого цемента, что примерно в два раза превышает количество воды, требуемой для гидратации портландцемента. Поэтому смеси с водоцементным отношением менее 0,5 еще в недавнем прошлом не рекомендовались для применения. Однако в последнее время применение высоких водоцементных отношений признано нецелесообразным и наиболее предпочтительными считают смеси состава 1:7 или даже 1:9 с водоцементным отношением 0,35. Уплотнение бетонной смеси путем вибрации является необходимым. Поскольку глиноземистый цемент при гидратации химически связывает большее количество воды, чем портландцемент, то при одинаковых составах бетон на глиноземистом цементе характеризуется более низкой пористостью и, следовательно, более высокой непроницаемостью.

#### Химическая стойкость

Как отмечалось ранее, глиноземистый цемент был впервые разработан как сульфатостойкий цемент, и он действительно является таковым. Повышенная стойкость к сульфатной агрессии объясняется отсутствием  $Ca(OH)_2$  в гидратированном глиноземистом цементе, а также защитным влиянием сравнительно инертного геля и гидрата окиси алюминия, образованного в процессе гидратации. Следует отметить, что смеси более тощего состава, чем 1:8, характеризуются значительно меньшей сульфатостойкостью.

Глиноземистый цемент не подвергается воздействию растворенного в воде углекислого газа, и, следовательно, его применение целесообразно в производстве труб. Этот цемент не является кислотостойким, однако он может довольно хорошо противостоять действию слабых растворов ряда кислот (рН более 3,5—4), содержащихся в промышленных сточных водах, за исключением хлорноватой, фтористой и азотной кислот. С другой стороны, едкие щелочи, даже в слабых растворах, оказывают сильное агрессивное действие на глиноземистый цемент, растворяя гелеобразный глинозем. Химическая стойкость этого цемента к воздействию различных химических соединений изучена Хасси и Робсоном. Следует отметить, что, хотя глиноземистый цемент очень хорошо противостоит действию морской воды, ее не следует применять в качестве воды затворения. Морская вода отрицательно влияет на схватыва-

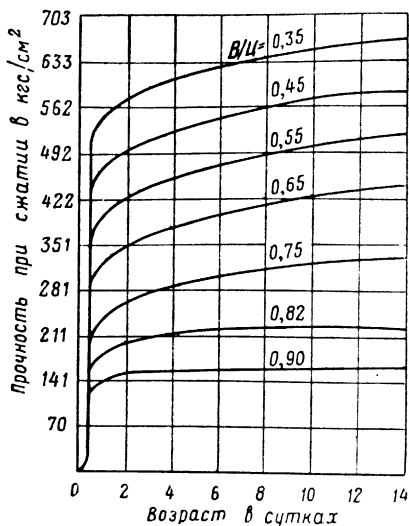


Рис. 2.6. Рост прочности опытных цилиндров, изготовленных из бетона на глиноземистом цементе с различными водоцементными отношениями и твердевших при температуре 18°С и относительной влажности 95%

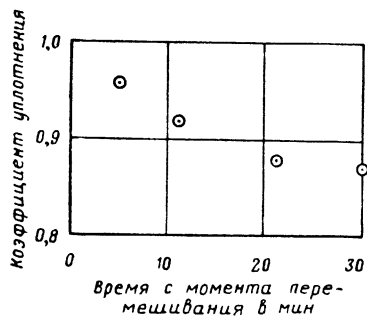


Рис. 2.7. Изменение коэффициента уплотнения во времени для бетона на глиноземистом цементе состава 1:2:4 с В/Ц = 0,55

ние и твердение цемента, по-видимому, вследствие образования хлоралюминатов. По этой же причине хлористый кальций ни при каких условиях не следует добавлять к глиноземистому цементу.

#### Физические свойства бетонов на глиноземистом цементе

Еще одним важным достоинством глиноземистого цемента является высокая скорость нарастания его прочности. Около 80% конечной прочности цемента достигается в возрасте 24 ч. Уже в возрасте 6—8 ч бетон на глиноземистом цементе достаточно прочен для того, чтобы произвести распалубку и проводить подготовку к следующему этапу бетонирования. На рис. 2.6 приведены кривые роста прочности во времени опытных образцов цилиндров, изготовленных из бетона с различными водоцементными отношениями и твердевших при комнатной температуре.

Бетон на глиноземистом цементе с заполнителем — глиноземистым клинкером при водоцементном отношении 0,5 — может достичь прочности 980 кгс/см² за 24 ч и 1260 кгс/см² за 28 суток. Такая чрезвычайно высокая прочность достигается благодаря вяжущим свойствам заполнителя, однако стоимость этого заполнителя очень высокая.

Следует подчеркнуть, что ускоренное твердение не вызывает ускоренного схватывания. В действительности, глиноземистый цемент — это медленно схватывающееся вяжущее, хотя интервал между концом и началом схватывания у глиноземистого цемента мень-

ше, чем у портландцемента. Например, средние значения сроков начала и конца схватывания у глиноземистых цементов соответственно составляют: у цемента А — 4 ч 40 мин и 5 ч 30 мин, у цемента В — 5 ч 20 мин и 5 ч 35 мин. BS 915:1947 предусматривает, чтобы срок начала схватывания находился в пределах 2—6 ч, а срок конца схватывания наступал

не позднее чем через два часа после начала схватывания. Из минералов клинкера глиноземистого цемента  $C_5A_3$  схватывается в течение нескольких минут, в то время как  $CA$  схватывается значительно медленнее. Поэтому чем выше для цемента отношение  $C/A$ , тем быстрее происходит схватывание. С другой стороны, чем выше содержание стеклообразных фаз в цементе, тем медленнее он схватывается.

На сроки схватывания глиноземистого цемента существенно влияют добавки гипса, извести, портландцемента и органических веществ, поэтому их не следует использовать в качестве добавок.

Вероятно, быстрое схватывание  $C_5A_3$  является в некоторых случаях причиной потери удобоукладываемости бетонными смесями на глиноземистом цементе, которая наступает в пределах 15—20 мин после начала перемешивания смеси. На рис. 2.7 показано изменение коэффициента уплотнения во времени для бетона состава 1 : 2 : 4 с водоцементным отношением 0,5. Измерение подвижности бетонной смеси по осадке конуса не рекомендуется, поскольку в отличие от портландцемента глиноземистый цемент не дает эффекта «жирной» смазки.

Можно отметить, что при одинаковых составах бетона бетонные смеси на глиноземистом цементе обладают лучшей удобоукладываемостью, чем смеси на портландцементе. Это объясняется, по-видимому, меньшей суммарной поверхностью зерен глиноземистого цемента, который в результате полного расплавления сырьевой шихты при его производстве приобретает более гладкую (остеклованную) поверхность зерен, чем портландцемент.

Ползучесть бетона на глиноземистом цементе мало отличается от ползучести бетона на портландцементе, если ее сравнивать при одинаковой степени напряженности.

#### Влияние температуры

Высокая интенсивность нарастания прочности глиноземистого цемента является следствием его быстрой гидратации, которая в свою очередь вызывает интенсивное тепловыделение. Оно может составить 9 кал/г на 1 ч твердения, в то время как у быстротвердеющего портландцемента тепловыделение за тот же период не превышает 3,5 кал/г. Однако общее тепловыделение находится в одних и тех же пределах у обоих типов цемента.

Высокая скорость тепловыделения бетона на глиноземистом цементе обуславливает необходимость укладки бетона лишь малыми объемами и не позволяет бетонировать на этом цементе массивные конструкции. Это требование является особенно важным, так как, во-первых, температурные деформации вызывают трещинообразование, что характерно также для бетонов на портландцементе, и, во-вторых, повышенная температура сама по себе отрицательно влияет на прочность глиноземистого цемента. Влияние температуры очевидно из данных табл. 2.3, где приведены значения прочности бетонов, твердевших в течение первых 24 ч при температуре 21,1 и 37,8°С и твердевших в дальнейшем при температуре 21,1°С. Эти данные подтверждают значительное снижение прочности при повышенных температурах.

Таблица 2.3. Влияние температуры твердения в течение первых 24 ч на прочность бетона на глиноземистом цементе с последующим твердением при температуре 21,1° С

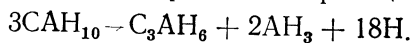
Тип цемента	Температура твердения в течение первых 24 ч в °С	Прочность при сжатии в кгс/см <sup>2</sup> в возрасте бетона			
		1 сутки	3 суток	7 суток	28 суток
А	21,1	287	302	295	257
	37,8	192	197	197	128
В	21,1	246	286	301	321
	37,8	160	179	193	122
С	21,1	207	189	294	284
	37,8	165	176	194	159
D	21,1	261	285	312	284
	37,8	193	231	188	114
E	21,1	248	309	330	351
	37,8	202	193	203	135
F	21,1	316	399	410	435
	37,8	224	224	225	188

Примечание. Общие низкие значения прочности бетонов являются следствием использования цементов, изготавливавшихся в 20-х годах этого столетия.

Твердение во влажных условиях в течение первых 24 ч может способствовать снижению роста температуры, хотя сами по себе влажные условия не являются необходимыми. Тем не менее интенсивный рост прочности в интервале 6—14 ч после приготовления смеси означает, что скорость гидратации в этот период очень велика и значительное количество воды затворения вступает в химическое взаимодействие. Удовлетворительная гидратация не может быть достигнута, если вода испаряется из бетона в течение первых 18 ч, даже если бетон в дальнейшем хранится в воде. Поэтому следует предохранять бетон от испарения воды с момента его укладки. После наступления конца схватывания влажные условия твердения должны поддерживаться до возраста бетона на 18—24 ч.

На прочность бетона на глиноземистом цементе отрицательно влияет повышенная температура также и в позднем возрасте, если бетон хранится во влажных условиях. Это означает, что бетон, должным образом уложенный и твердевший и обладающий достаточно высокой прочностью, будет терять значительную часть своей прочности вследствие нахождения в условиях повышенной температуры и влажности.

Сбросы прочности связывают с превращением неустойчивых гексагональных гидроалюминатов кальция  $3\text{АН}_{10}$  и  $\text{С}_2\text{АН}_8$  в кубический гидроалюминат  $\text{С}_3\text{АН}_6$ , при этом происходит реакция следующего типа:





Кубический гидрат содержит меньше кристаллизационной воды, чем гексагональный. Однако возможно, что образуется  $C_4AH_{19}$ -гидрат с большим количеством кристаллизационной воды.

Изменение прочности можно проследить по кривым на рис. 2.8, которые характеризуют потерю прочности цементно-песчаного раствора состава 1:5,6 с  $B/C=0,65$  в результате длительного твердения в воде при температуре  $40^\circ C$ . Прочность этого же раствора, твердевшего в воде при комнатной температуре, составила  $520 \text{ кгс/см}^2$  в возрасте 3 суток и  $577 \text{ кгс/см}^2$  в возрасте 14 суток. Тот же рисунок показывает, что падение прочности происходит также при умеренно повышенных температурах, а именно  $25$  и  $30^\circ C$ . В этих испытаниях образцы помещали в условия повышенной температуры в возрасте 6 ч. Подобное воздействие было обнаружено и при хранении образцов над водой. Повышение температуры твердения в течение первых двух суток ускоряет химические реакции, повышая таким образом прочность, однако это не имеет практического значения, так как в дальнейшем прочность падает и скорость

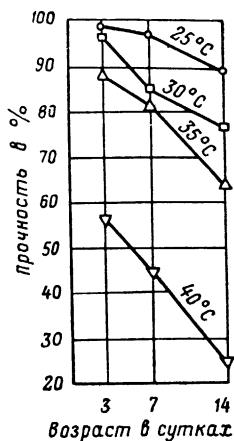


Рис. 2.8. Прочность цементно-песчаного раствора состава 1:5,6 на глиноземистом цементе, твердевшего при различных температурах (в % от прочности этого же раствора, твердевшего в воде при комнатной температуре)

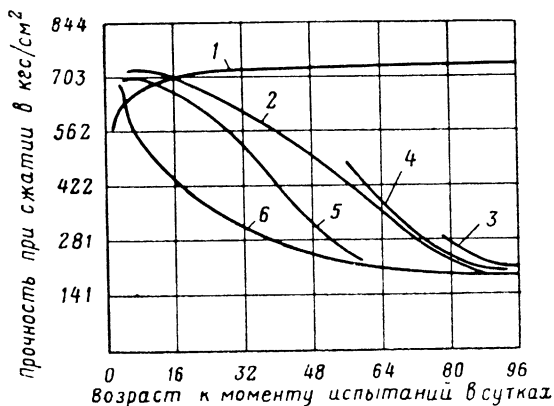


Рис. 2.9. Зависимость прочности при сжатии цементно-песчаного раствора с  $B/C=0,45$  на глиноземистом цементе от возраста, в котором образцы были помещены в воду при температуре  $40^\circ C$

1 — твердение при  $17,8^\circ C$ ; 2 — возраст 4 сут.; 3 — то же, 56 сут.; 4 — 28 сут.; 5 — 7 сут.; 6 — 6 ч

падения прочности тем больше, чем выше температура. Падение прочности может происходить в любом возрасте при повышении температуры (рис. 2.9), хотя, если температура повышается спустя 24 ч, после бетонирования, скорость снижения прочности уменьшается.

Вне зависимости от скорости падения прочности бетон данного состава достигает со временем определенной остаточной прочности, т. е.

прочности бетона, в цементном камне которого весь гексагональный гидроалюминат кальция уже превратился в устойчивый кубический  $C_3AH_6$ . Бетоны из тощих смесей характеризуются большей потерей прочности. Например, бетон с  $B/C=0,29$  снизил прочность с 930 до 550  $кгс/см^2$ , а бетон с  $B/C=0,65$  с 436 до 53  $кгс/см^2$ .

На рис. 2.10 приведена прочность различных бетонов, твердевших в течение 100 суток при температурах 18 и 40° С с последующим твердением при комнатной температуре.

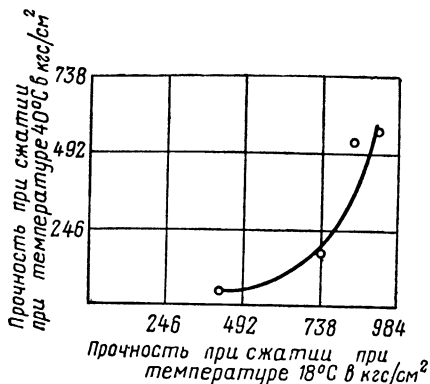


Рис. 2.10. Соотношение прочности бетонных кубов на глиноземистом цементе, твердевших в течение 100 суток при температурах 40 и 18° С с последующим твердением при 18° С

Кратковременное нахождение бетона в условиях повышенных температур и влажности вызывает лишь небольшую потерю прочности, но это воздействие носит кумулятивный характер — если превращения уже произошли, восстановление прочности невозможно.

Исследования, проведенные недавно, показали, что превращения происходят не только при температурах, превышающих определенные критические значения, но и при обычных характерных для Англии. Скорость превращений тем меньше, чем ниже температура. При обычных температурах эти превращения очень медленные. Поэтому снижение прочности обычно наблюдается только примерно через 5 лет. В длительные сроки потеря прочности, тем не менее, довольно значительна, что подтверждается данными, приведенными в табл. 2.4.

Как упоминалось ранее, высохший бетон не подвергается деструкции, однако если повышенная температура воздействует на образец, еще содержащий воду затвердения в свободном состоянии, то скорость испарения недостаточно велика для того, чтобы предотвратить процесс перекристаллизации (деструкции) цементного камня. Это справедливо даже для образцов малого размера, так как бетон высокого качества на глиноземистом цементе недостаточно проницаем, чтобы обеспечить быстрое испарение воды.

В Италии было обнаружено, что плиты аэродромных покрытий бы-

Таблица 2.4. Длительная прочность бетонов на глиноземистом цементе

Условия хранения образцов*	$V/C^{**}$	Удобоукладываемость	Прочность бетона в возрасте 21 год в $кгс/см^2$	Отношение прочности в возрасте 21 год к максимальной прочности бетона в % <sup>***</sup>
В лаборатории	0,4	Плохая	386	55
	0,64	Хорошая	690	41
На открытом воздухе	0,4	Плохая	200	31
	0,64	Хорошая	134	23

\* Бетонные кубы размером 20,3×20,3×20,3 см были распалублены в возрасте 24 ч, твердели в течение 7 суток покрытые влажной джутовой тканью, затем их держали в лаборатории при температуре 18—20° С в течение 28 суток и после этого хранили в лаборатории или на открытом воздухе.

\*\* Расход цемента составлял 280  $кг/м^3$ .

\*\*\* В большинстве случаев максимальная прочность достигалась в возрасте примерно 1 года.

стро разрушались под действием выхлопных самолетных газов. Известно, что сбросы прочности бетона на глиноземистом цементе наблюдаются и тогда, когда радиационное или инфракрасное излучение воздействует на влажный бетон, например сразу после его укладки.

Из сказанного следует, что за исключением бетонов с повышенным расходом цемента и высокой прочностью бетоны на глиноземистом цементе, как правило, не следует применять в конструктивных элементах. Европейский комитет по бетону рекомендует, чтобы применение глиноземистого цемента было предметом специального рассмотрения.

Перекристаллизация гидроалюминатов увеличивает пористость цементного камня, поэтому сбросы прочности сопровождаются заметным уменьшением стойкости бетона к сульфатной агрессии, но, по-видимому, на стойкости к кислотной агрессии это не сказывается. Учитывая сравнительно небольшое снижение прочности бетона, приготовленного из жирных смесей, применение растворов на глиноземистом цементе для омоноличивания стыков сборных предварительно напряженных конструкций не является опасным, однако все же во многих странах использование бетона на глиноземистом цементе запрещено в целом ряде конструкций.

Интересный способ предупреждения отрицательного влияния превращений гидроалюминатов предложен Будниковым. Гипс или ангидрит ( $CaSO_4$ ) добавляют к глиноземистому цементу в количестве 25% веса цемента. Алюминаты ( $CA$  и  $C_5A_3$ ) взаимодействуют с гипсом с образованием  $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot H_{31}$ , но так как реакция происходит до окончания схватывания смеси и стабилизации объема, образование гидросульфата алюмината кальция не вызывает разрушительных действий (см. раздел,

посвященный сульфатной агрессии). Затвердевший цемент быстро набирает прочность и достигает высокой прочности, величина которой возрастает с ростом температуры. Цемент характеризуется также высокой стойкостью к химическому воздействию сульфатов и хлоридов. Добавка гипса способствует преодолению отрицательного влияния перекристаллизации, она в действительности изменяет природу цемента: получается новый вид цемента — ангидрито-глиноземистый цемент.

### Жаростойкие свойства

Затвердевший бетон на глиноземистом цементе, нагретый до высокой температуры, обладает удовлетворительной прочностью. Сопротивление глиноземистого цемента нагреванию в сухих условиях в действительности настолько велико, что этот цемент является одним из отличных жаростойких материалов. Это в значительной степени обусловлено образованием керамического сцепления вместо цементного гидравлического. Во избежание перекристаллизации, вызываемой повышением температуры в раннем возрасте, необходимо, чтобы бетон твердел во влажных условиях при комнатной температуре в течение первых 24 ч после приготовления.

Бетон, приготовленный на глиноземистом цементе с огнеупорным заполнителем, таким как щебень из огнеупорного кирпича, является стойким к температурам до  $1300^{\circ}\text{C}$ . Для температур до  $1600^{\circ}\text{C}$  необходимо использовать специальные заполнители, например, плавный глинозем или карборунд. Температуру порядка  $1800^{\circ}\text{C}$  выдерживают бетоны, приготовленные из специального белого кальциево-глиноземистого цемента с плавным глиноземистым заполнителем. Этот цемент содержит примерно 72% глинозема, 26% окиси кальция, по 1% окислов железа и кремния. Его минералогический состав приближается к  $\text{C}_3\text{A}_5$ . Для сравнения можно отметить, что бетон на портландцементе не может длительно выдерживать воздействие температуры выше  $500^{\circ}\text{C}$ .

Жаростойкий бетон на глиноземистом цементе характеризуется хорошей стойкостью к кислотной агрессии, и нагревание до  $900\text{—}1000^{\circ}\text{C}$  заметно увеличивает кислотостойкость этого бетона.

Применение жаростойкого бетона более предпочтительно по сравнению с огнеупорной кирпичной кладкой, так как последняя расширяется при нагревании, что требует устройства температурных швов. Бетон на глиноземистом цементе может быть применен в монолитном или сборном исполнении (со стыками впритык) точно по требуемым форме и размеру. Потеря воды при первом нагревании вызывает усадку, примерно равную по значению термическому расширению. При охлаждении, вызванном, например, остановкой работ, стыки могут несколько приоткрываться в результате термического сжатия, однако при повторном нагревании они будут снова закрываться. При температурах до  $950^{\circ}\text{C}$  для теплоизоляции может быть использован легкий бетон на глиноземистом цементе и легком заполнителе. Такой бетон характеризуется плотностью  $480\text{—}960\text{ кгс/м}^3$ .

## Схватывание смеси из портландцемента и глиноземистого цемента

Как уже отмечалось, схватывание смесей из портландцемента и глиноземистого цемента происходит ускоренно, а при содержании одного из этих цементов в пределах 20—80% веса смеси может произойти мгновенное схватывание. Общий вид кривых, подтверждающих эту закономерность, приведен на рис. 2.11, однако для конкретных цементов необходимо проводить пробные испытания. Ускоренное схватывание происходит в результате образования гидрата  $C_4A$  при взаимодействии известки из портландцемента и алюмината кальция из глиноземистого цемента. Кроме того, гипс, содержащийся в портландцементе, может взаимодействовать с гидроалюминатом кальция, и в результате может произойти схватывание портландцемента.

Смеси этих цементов в надлежащих пропорциях применяют тогда, когда необходимо быстрое схватывание, например для заделки течей, или в конструкциях, возводимых в зоне прилива-отлива, однако конечная прочность бетона из таких смесей весьма низкая.

Принимая во внимание только что описанное быстрое схватывание смесей из портландцемента и глиноземистого цемента, важно при изготовлении обычных бетонных конструкций быть уверенным, что эти цементы не будут смешаны друг с другом. Укладка портландцементного бетона на отвердевший бетон из глиноземистого цемента может быть произведена не ранее чем через 24 ч, а укладывать бетон из глиноземистого цемента на отвердевший портландцементный бетон следует не менее чем через 3—7 суток.

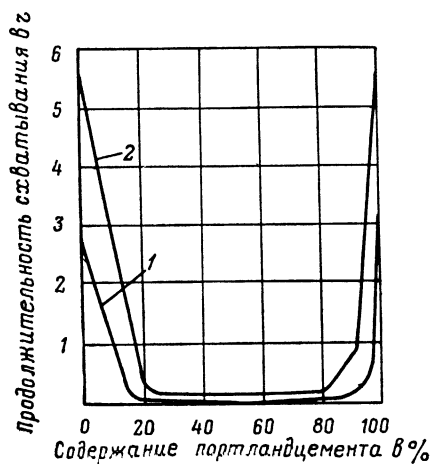


Рис. 2.11. Сроки схватывания смесей из портландцемента и глиноземистого цемента

1 — начало схватывания; 2 — конец схватывания

## УСКОРИТЕЛИ И ЗАМЕДЛИТЕЛИ ТВЕРДЕНИЯ

Некоторые свойства цемента можно изменить, если применить соответствующие добавки, что позволит уменьшить использование специальных цементов. Промышленность выпускает большое число таких веществ. Их влияние на свойства цемента указывается фирмами-изготовителями, однако конкретное действие каждой добавки должно быть тщательно проверено перед ее непосредственным применением. В этой книге будут рассмотрены только два основных и хорошо проверенных типа добавок:

одного ускорителя и одной группы замедлителей. Ускоряющее или замедляющее воздействие относится к росту прочности, но не к схватыванию цемента.

### Хлористый кальций

Введение хлористого кальция в состав бетонной смеси повышает интенсивность нарастания прочности, и этот ускоритель применяют при необходимости бетонирования при пониженных температурах (в районах с температурой от  $-11$  до  $-7^{\circ}\text{C}$ ) или при срочном ремонте.

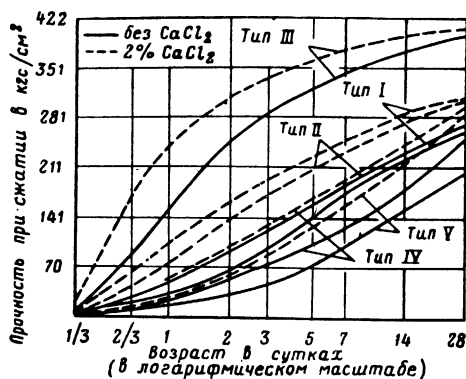


Рис. 2.12. Влияние  $\text{CaCl}_2$  на прочность бетонов, приготовленных на цементах различных типов (для цемента типа V)

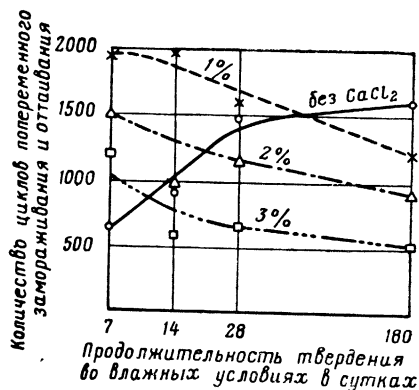


Рис. 2.13. Морозостойкость бетона, твердевшего во влажных условиях при температуре  $4,4^{\circ}\text{C}$ , при различном содержании  $\text{CaCl}_2$

Хлористый кальций повышает скорость тепловыделения смеси в течение первых нескольких часов: по-видимому, он является катализатором реакции гидратации  $\text{C}_3\text{S}$  и  $\text{C}_2\text{S}$ . Гидратация  $\text{C}_3\text{A}$  при введении хлористого кальция в некоторой степени замедлена, однако нормальный процесс гидратации цемента не нарушается. Хлористый кальций может быть добавлен к быстротвердеющему и обычному портландцементу. Чем выше скорость твердения самого цемента, тем раньше проявляется действие ускорителя. Однако хлористый кальций нельзя использовать с глиноземистым цементом. Быстротвердеющий портландцемент в результате добавки  $\text{CaCl}_2$  может достичь прочности  $70 \text{ кгс/см}^2$  в возрасте 1 суток, в то время как обычный портландцемент может достичь этой прочности только на 3—7-е сутки. К 28-суточному возрасту прочность быстротвердеющего цемента с добавкой и без добавки  $\text{CaCl}_2$  практически одна и та же, но обычный портландцемент с добавкой  $\text{CaCl}_2$  обладает большей прочностью, чем без добавки.

Результаты исследований, проведенных Хикки на цементах различных типов, приведены на рис. 2.12. Полагают, что на величину длительной прочности бетона добавка  $\text{CaCl}_2$  не влияет. Хлористый кальций обычно сильнее способствует повышению прочности в ранние сроки жирных смесей с низким водоцементным отношением, чем тощих смесей.

Количество  $\text{CaCl}_2$ , вводимое в состав смеси, следует тщательно контролировать. При вычислении требуемого количества можно считать, что добавка 1% веса цемента ( $\text{CaCl}_2$ ) оказывает на скорость твердения такое же воздействие, как повышение температуры на  $6^\circ$ . Добавка хлористого кальция в количестве 1—2% является обычно достаточной. Хлористый кальций ускоряет схватывание, и чрезмерное количество  $\text{CaCl}_2$  может вызвать мгновенное схватывание. Ниже приведены данные, показывающие влияние  $\text{CaCl}_2$  на сроки схватывания. Добавка  $\text{CaCl}_2$ ,

ускоряя схватывание, полезна при ремонтных работах, например когда течь воды должна быть быстро остановлена.

Важно, чтобы хлористый кальций был равномерно распределен в смеси, лучше всего это достигается путем растворения добавки в воде затворения перед ее введением в бетоносмеситель. Целесообразно предварительно готовить концентрированный раствор  $\text{CaCl}_2$ .

Содержание $\text{CaCl}_2$ в % от веса цемент	Ускорение схватывания в мин
0,1	25
0,3	35
0,5	45
1	85

В тех случаях, когда существует опасность снижения долговечности бетона в результате внешнего воздействия, добавка хлористого кальция не рекомендуется. Например, стойкость цемента к сульфатной агрессии снижается в результате добавки  $\text{CaCl}_2$ , особенно у тощих смесей. Если заполнитель является реакционноспособным, имеется повышенный риск возникновения реакции щелочи с заполнителем. Однако когда эта реакция эффективно контролируется применением низкощелочного цемента и введением активных минеральных добавок, влияние  $\text{CaCl}_2$  очень мало. Еще одно отрицательное влияние добавки  $\text{CaCl}_2$  заключается в том, что она увеличивает усадку примерно на 10% и, возможно, увеличивает также ползучесть. Хотя добавка  $\text{CaCl}_2$  снижает опасное воздействие мороза в течение первых нескольких дней после укладки бетона, морозостойкость бетона с воздухововлекающими добавками в более позднем возрасте ухудшается, что подтверждается данными, приведенными на рис. 2.13. С другой стороны, выявлено, что  $\text{CaCl}_2$  повышает стойкость бетона к эрозии и истиранию, причем эта стойкость сохраняется в любом возрасте.

Возможность коррозии арматурной стали в результате добавки в бетон хлористого кальция пока недостаточно изучена, однако Бюро США по рекламации — крупный потребитель бетона — считает, что пока нет доказательств, что применение хлористого кальция в надлежащем количестве отрицательно влияет на коррозию арматуры<sup>1</sup>. В более пори-

<sup>1</sup> Хлористый кальций депассивирует сталь в щелочной среде, что приводит к возможности коррозии арматуры в условиях переменной влажности в бетоне недостаточной плотности, при наличии трещин и малой толщине защитного слоя. Подробнее см. [35]. (Прим. ред.)

стом бетоне, полученном с использованием высокого водоцементного отношения, некоторая коррозия арматуры наблюдается в раннем возрасте, однако она не прогрессирует. Выявлено, что применение хлористого кальция ведет к коррозии предварительно напряженной проволоки, поэтому его не следует применять при производстве предварительно напряженного железобетона. То же самое относится к пропариванию, так как имеется серьезная опасность сильной коррозии арматуры. Однако, когда подвергают пропариванию неармированный бетон,  $\text{CaCl}_2$  повышает прочность бетона и позволяет использовать повышенную скорость подъема температуры для сокращения сроков твердения.

Влияние хлористого натрия менее интенсивно, чем хлористого кальция. К тому же влияние  $\text{NaCl}$  менее устойчиво, также отмечаются снижение теплоты гидратации и сбросы прочности к 7-суточному и более позднему возрасту. Поэтому применение  $\text{NaCl}$  нежелательно.

### Замедлители

Замедление схватывания цементного теста может быть достигнуто введением в смесь специальных веществ — замедлителей. Они также, как правило, замедляют твердение теста, хотя некоторые соли могут ускорить схватывание и в то же время снижать интенсивность роста прочности.

Применение замедлителей целесообразно при бетонировании в жарких условиях, когда в результате воздействия повышенной температуры нормальные сроки схватывания сокращаются. Замедленное твердение, вызываемое замедлителями, может быть использовано для получения архитектурной отделки бетонных элементов. Для этого замедлитель наносят на внутреннюю поверхность стенок формы, что способствует замедлению твердения прилегающего к стенкам слоя цемента. После распалубки форм пограничный слой бетона вычищают, при этом бетонная поверхность приобретает текстуру заполнителя.

Замедляющее воздействие оказывают сахар, производные углеводов, растворимые цинковые соли, растворимые соли борной кислоты и др. На практике наиболее часто применяют те замедлители, которые являются одновременно и пластифицирующими добавками. Применяя замедлители, необходимо уделять особое внимание их правильной дозировке, так как в противном случае они могут препятствовать схватыванию и твердению бетона. Известны случаи получения, казалось бы, необъяснимого снижения прочности бетона, когда для перевозки проб заполнителей в лабораторию были использованы мешки из-под сахара или когда для транспортирования свежеприготовленной бетонной смеси были использованы мешки из-под черной патоки.

Выявлено, что при добавке к цементу сахара в количестве лишь 0,05% веса цемента прочность бетона в суточном возрасте снижается до нуля и в 3-суточном возрасте — до 50% прочности того же бетона без добавки сахара. Однако результаты различных исследований являются весьма противоречивыми. Например, сообщалось, что аналогичное количество сахара повышает 3-суточную прочность на 10%, а прочность в более позднем возрасте — на 20%. Тем не менее из-за замедлен-



ного схватывания интенсивность роста прочности в первые трое суток была пониженной. Возможное объяснение этих противоречий может заключаться в том, что замедленное схватывание способствует образованию более плотного геля и, следовательно, получению повышенной конечной прочности. Из-за этих противоречивых данных сахар обычно не применяют в качестве замедлителей. Несомненно, что весьма желательным предварительно при практическом применении определить действие конкретного замедлителя на пробных замесах, приготовленных на том цементе, который будет использован в строительстве.

Практическое применение сахара возможно для предупреждения схватывания цемента, например в тех случаях, когда вышедшие из строя бетоносмеситель или шламбассейн нельзя быстро освободить. Однако избыток сахара может дать и противоположный эффект. Несмотря на невысокую прочность, быстросхватывающийся цемент с трудом удаляется из емкостей.

### ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИЕ ДОБАВКИ

Пластифицирующие добавки этого типа рассматриваются здесь, поскольку многие из них являются одновременно и замедлителями схватывания.

Следующие две основные группы веществ обладают комбинированными свойствами:

1) лигносульфоновые кислоты и их соли (известные как класс I в номенклатуре ASTM);

2) гидроксильные карбоксильные кислоты и их соли (известные как класс III).

Модификации и производные указанных веществ, известные как класс II и IV соответственно, не являются замедлителями и могут вести себя как ускорители (рис. 2.14).

Основными активными компонентами смесей являются поверхностно-активные вещества. Это вещества, которые концентрируются на поверхности раздела двух соприкасающихся фаз и изменяют силовое поле, создаваемое в результате физико-химических процессов на поверхности раздела. Поверхностно-активные вещества адсорбируются на цементных зернах, давая им отрицательный заряд, который способствует отталкиванию зерен друг от друга и стабилизирует их дисперсное состояние. Кроме того, указанный заряд вызывает образование вокруг каждого цементного зерна слоя из полярных ориентированных молекул воды, препятствующего сближению отдельных зерен. Цементные зерна становятся более подвижными, и вода, освобожденная от удерживающего влияния коагуляционной си-



Рис. 2.14. Влияние различных пластифицирующих добавок на сроки схватывания бетона

стемы, получает возможность выполнять роль смазки, что приводит к повышению удобоукладываемости. Сохранение высокодисперсного состояния цемента способствует увеличению площади поверхности зерен, и, следовательно, процесс гидратации цемента протекает с повышенной скоростью в раннем возрасте. Именно поэтому прочность бетона при одном и том же водоцементном отношении с добавкой выше, чем при отсутствии добавки. Более однородное распределение диспергированного цемента в бетоне также может способствовать повышению прочности. В частности, увеличение прочности бетона заметно в раннем возрасте и в определенных условиях сохраняется в течение длительного периода.

Влияние добавок на прочность в значительной степени зависит от состава цемента; наибольшее увеличение прочности встречается у цементов с низким содержанием щелочи или  $C_3A$ .

На некоторые цементы добавки оказывают небольшое влияние, однако в целом добавки являются эффективными для всех типов портландцемента, а также глиноземистого цемента.

В результате применения пластифицирующих добавок количество воды затворения может быть снижено на 5—15% (см. табл. 2.5).

**Таблица 2.5. Снижение водопотребности бетонной смеси в результате применения различных пластифицирующих и замедляющих схватывание добавок**

Характеристика	Воздуховлекающая добавка (нейтрализованная смола винсол)	Пластифицирующая и замедляющая схватывание добавка класса			
		I	II	III	IV
Осадка конуса в см	7	7	6,3	7,6	7,6
Воздухововлечение в %	4,8	4,3	4,5	4,5	4,7
Снижение водопотребности по сравнению с бетоном без воздухововлечения в %	8	13	11	13	12

Частично снижение водопотребности во многих случаях (особенно с добавками класса I) происходит благодаря воздухововлечению, обусловленному наличием добавки.

Фактическое снижение водопотребности зависит от расхода цемента, типа использованного заполнителя, наличия воздухововлекающих или активных минеральных добавок. Поэтому для определения типа и количества добавки, которая обеспечит получение оптимальных свойств бетона, необходимо сделать пробные замесы на тех же материалах, которые будут применены на практике. Следует также отметить, что хотя добавки и замедляют схватывание, они не всегда снижают скорость потери удобоукладываемости со временем.

Количество вводимой добавки составляет обычно лишь доли процента от веса цемента, поэтому желателен использование надежного оборудования для дозирования.

Так как заполнители занимают не менее трех четвертей объема бетона, не удивительно, что их качеству придается важное значение. Свойства заполнителей влияют не только на прочность бетона, но и в значительной степени на его долговечность и эксплуатационные свойства.

Первоначально заполнители рассматривали как распределенный в цементном тесте инертный материал, применяемый в основном по экономическим соображениям. Можно придерживаться и противоположного мнения и рассматривать заполнители как строительный материал, связанный в единое целое цементным камнем, как и в сооружениях из каменной кладки. В действительности заполнители не являются полностью инертным материалом, так как их физические, теплотехнические и иногда химические свойства оказывают определенное влияние на эксплуатационные свойства бетона.

Заполнитель дешевле, чем цемент, и, следовательно, экономически выгодно, чтобы в бетонной смеси было как можно больше заполнителя и как можно меньше цемента. Однако экономические соображения не являются единственными при использовании заполнителя. Присутствие соответствующих заполнителей в бетоне значительно улучшает строительно-технические свойства материала, поскольку по сравнению с цементным камнем бетон характеризуется повышенной объемной устойчивостью и долговечностью.

### **ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ**

---

Для бетона используют заполнитель с размером зерен в поперечнике от тысячных долей сантиметра до нескольких сантиметров. Наибольшая крупность заполнителя может быть различной, однако любой заполнитель содержит зерна неодинакового размера; распределение зерен по фракциям называют зерновым составом заполнителя. Для получения бетона невысокой прочности иногда используют заполнитель непосредственно из залежей, содержащих зерна различного размера, от самых мелких до самых крупных. Такой заполнитель называют карьерным не-

фракционированным заполнителем<sup>1</sup>. Для получения бетона хорошего качества обычно используют заполнители, по крайней мере, двух типов: мелкий заполнитель (песок) с размером зерен не более 0,476 см и крупный с размером зерен не менее 0,476 см. В США разделение на мелкий и крупный заполнители проводят на сите № 4, размер отверстий которого лишь на 0,0013 см меньше, чем 0,476 см (см. табл. 3.14). Указанное деление позволяет при дальнейшем рассмотрении проводить различие между мелким и крупным заполнителем.

Обычно считают, что минимальный размер зерен песка составляет примерно 0,07 мм и несколько меньше. Частицы размером 0,002—0,06 мм представляют собой пыль или ил, частицы еще меньшего размера называют глиной. Суглинок представляет собой мягкую породу, состоящую из примерно равного количества песка, ила и глины.

Первоначально все зерна заполнителя являлись частью исходной горной породы, которая могла быть разделена на отдельные куски и зерна или в результате природных процессов выветривания, или искусственным способом — дроблением. Поэтому свойства заполнителей полностью зависят от свойств исходной горной породы, например химико-минералогического состава, петрографических характеристик, удельного веса, твердости, прочности, физико-химической стойкости, пористости, цвета и т. д. С другой стороны, некоторые свойства заполнителей не определяются характеристиками исходной горной породы, а присущи только зернам заполнителя, такие как форма и размер зерен, текстура поверхности, абсорбционная способность (водопоглощение). Все эти свойства могут оказывать большое влияние на качество как свежееуложенной бетонной смеси, так и затвердевшего бетона.

Следует добавить, что, хотя свойства заполнителей могут быть непосредственно исследованы путем испытаний, представляется затруднительным охарактеризовать хороший заполнитель, не определив, как этот заполнитель будет влиять на свойства бетона в определенных условиях эксплуатации. Качество заполнителей необходимо проверять и непосредственно в бетоне, иногда по некоторым показателям заполнитель может оказаться неудовлетворительным, однако его использование в бетоне не вызывает беспокойства. Например, образец из горной породы может дать отрицательные результаты при испытаниях на морозостойкость, однако, если заполнитель находится в бетоне, этого может не произойти, особенно в тех случаях, когда зерна заполнителя надежно покрыты цементным камнем низкой проницаемости. Однако маловероятно, что на заполнителе, считающемся неудовлетворительным более чем по одному показателю, будет приготовлен бетон удовлетворительного качества. Таким образом, испытания непосредственно заполнителей оказывают существенную помощь при оценке их пригодности для использования в бетоне.

---

<sup>1</sup> Применение природных гравийно-песчаных смесей без их разделения на фракции, как правило, не допускается из-за неоднородности гранулометрического состава. (Прим. ред.)

## КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИРОДНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ

До сих пор мы рассматривали заполнители только из встречающихся в природе материалов. Однако заполнители могут быть также получены из промышленных продуктов.

С петрографической точки зрения заполнители, как дробленые, так и уменьшенные в размере природным путем, могут быть разделены на несколько групп горных пород, имеющих общие характеристики. Наиболее удобной представляется классификация BS 812 : 1960, в которой в соответствии с типом горной породы природные заполнители разделены на следующие группы:

группа базальта — андезит, базальт, основные порфириты, диабаз, флериты всех типов (включая тералит и тешенит), эпидиорит, роговообманковый сланец, лампрофир, кварцевый флерит, спилит;

кремневая группа — кремнистый сланец, кремень; группа габбро — основной диорит, основной гнейс, габбро, роговая обманка, норит, перидотит, пикрит, серпентин;

группа гранита — гнейс, гранит, гранодиорит, гранулит, пегматит, кварцевый диорит, сиенит;

группа крупнозернистого песчаника — агломерат, аркоз, брекчия, конгломерат, вакка, крупнозернистый песчаник, песчаник, туф;

группа роговика — видоизмененные горные породы всех типов, за исключением мрамора;

группа известняка — доломит, известняк, мрамор;

группа порфира — аллит, дацит, фельсит, гранофир, кератофир, микрогранит, порфир, кварцепорфирит, риолит, трахит;

группа кварцита — ганистер, кварцитовые песчаники, перекристаллизовавшийся кварцит;

группа сланца — филлит, глинистый сланец, кремнистый сланец, все сильно метаморфизированные горные породы.

Классификация по группам не означает пригодности любого заполнителя для производства бетона: несоответствующий заполнитель может находиться в любой группе, хотя некоторые группы пород характеризуются лучшими показателями. Следует также помнить, что многие приведенные названия заполнителей часто не соответствуют точной петрографической классификации.

В стандарте ASTM C 294—56 приводятся некоторые минералы, наиболее часто встречающиеся в заполнителях. Классификация по минералогическому составу помогает предварительной оценке свойств заполнителя, однако на ее основе нельзя точно предсказать целесообразность применения того или иного заполнителя в бетоне, поскольку универсальных минералов, наличие которых в заполнителе желательно во всех случаях, не существует. В то же время некоторые минералы являются нежелательными во всех случаях. 10 классификаций ASTM предусматривают следующие минералы: кремнеземистые минералы (кварц, опал, халцедон, тридимит, кристобалит), полевые шпаты, слюдяные минера-

лы, карбонатные минералы, сульфиды, ферромагнетиальные минералы, цеолиты, окислы железа, глинистые минералы.

Рассмотрение подробностей петрографических и минералогических методов выходит за рамки данной книги, однако важно себе представить, что анализ заполнителей с геологической точки зрения оказывает существенную помощь при оценке их качества и, в частности, для выявления свойств вновь используемого заполнителя путем его сравнения с заполнителями с известными эксплуатационными характеристиками, при этом могут быть обнаружены отрицательные качества, как, например, присутствие в заполнителе некоторых неустойчивых форм кремнезема. В случае использования искусственных заполнителей может быть также изучено влияние технологии производства на качество заполнителей.

### ОТБОР ПРОБ

Определять различные свойства заполнителя приходится на образцах, изготовленных из исходной горной породы. В этом случае результаты испытаний относятся, строго говоря, только к материалу заполнителя. Однако поскольку нас интересуют свойства заполнителя в его массе, т. е. в том виде, в котором он применяется или поставляется, необходимо, чтобы отобранная для испытаний проба характеризовала средние свойства заполнителя. Такую пробу называют представительной, ее получают путем объединения частичных проб, количество которых должно быть не менее 10. Вес средней пробы должен быть не менее значений, приведенных ниже, для зерен различной крупности, как это предусмотрено BS 812 : 1960.

Наибольшая крупность заполнителя в мм	Минимальный вес средней пробы в кг
63,5	101,6
50,8	101,6
38,1	50,8
25,4	50,8
19,05	25,4
12,7	12,7
9,53	6,35
6,35 и менее	3,18

При хранении заполнителя на открытом складе частичные пробы следует отбирать таким образом, чтобы исключить влияние сегрегации, которая особенно заметна при большой высоте штабеля. В этом случае пробы отбирают в точках, находящихся на различной высоте от вершины до основания штабеля.

Из данных, приведенных выше, ясно, что средняя проба заполнителя может быть довольно большой по весу, особенно при использовании

заполнителя с большой крупностью зерен, и, следовательно, перед проведением испытаний среднюю пробу необходимо сократить. На всех этапах сокращения пробы необходимо принять все меры для того, чтобы сокращенная проба обладала теми же свойствами, что и средняя проба заполнителя. Применяют два способа сокращения пробы: квартование и с помощью желобчатого делителя. Оба способа позволяют разделить пробу на две одинаковые части. Если полученная проба продолжает оставаться все еще слишком большой, ее снова сокращают дальнейшим квартованием или повторным пропуском через делитель, и так поступают до получения необходимого размера сокращенной пробы.

### **ФОРМА И ТЕКСТУРА ЗЕРЕН**

---

Наряду с петрологическими характеристиками заполнителя важными являются его внешние данные, в частности форма и текстура поверхности зерен. Форму трехмерных тел довольно сложно описать, и поэтому целесообразно дать определения требуемым геометрическим характеристикам таких тел. Окатанность, или округленность, зерен характеризует их относительную острогранность или угловатость. Степень окатанности зерен определяется в основном прочностью и истираемостью исходной горной породы, а также износом, которому уже подвергались сами зерна. Форма зерен дробленого заполнителя зависит от типа исходной горной породы, типа используемой камнедробилки и степени измельчения материала, т. е. отношения размера кусков горной породы до дробления к размеру зерен заполнителя после дробления.

Удобная классификация возможных форм зерен заполнителя дается BS 812:1960 (табл. 3.1).

В США иногда применяется следующая классификация зерен заполнителя в зависимости от их формы:

хорошо окатанные	— первоначальные грани отсутствуют;
частично окатанные	— значительный износ, площадь граней уменьшена
частично остроугольные	— частичный износ, однако грани остались без изменения;
остроугольные	— незначительные признаки износа.

Так как степень заполнения объема зернами одной фракции зависит от их формы, то угловатость зерен заполнителя можно охарактеризовать в зависимости от объема пустот уплотненной пробы заполнителя. Стандартом BS 812:1960 показатель угловатости устанавливается 67 минус процентное объемное содержание зерен в пробе заполнителя, насыпанной по стандартной методике в соответствующую емкость. Для испытаний используют зерна, размер которых соответствует одной из следующих фракций заполнителя (в мм): 12,7—19,05; 9,53—12,7; 6,35—9,53; 4,77—6,35. При определении показателя угловатости число 67 означает процентное содержание зерен в пробе максимально окатанного гравия. Таким образом, показатель угловатости показывает, насколько пустотность испытываемого заполнителя превышает пустотность максимально окатанного гравия (т. е. 33%). Чем выше показатель угловатости, тем

Таблица 3.1. Классификация зерен заполнителя по их форме

Форма зерен	Характеристика зерен	Примеры
Окатанная	Зерна, полностью окатанные в результате механического воздействия воды или принявшие полностью округленную форму в результате их истирания	Речной и морской гравий, пустынный, морской и движущиеся от ветра пески
Неправильная	Зерна от природы неровной формы или зерна, частично принявшие неправильную форму в результате истирания и имеющие округленные грани	Прочие виды гравия
Пластинчатая	Зерна, толщина которых значительно меньше их ширины и длины	Слоистая горная порода
Угловатая	Зерна имеют хорошо очерченные ребра, образованные пересечением граней	Дробленые горные породы всех типов, обломочный материал (крупная галька), дробленый шлак
Игловатая	Остроугольные зерна, длина которых значительно больше ширины и толщины	—
Пластинчатая и игловатая	Зерна, длина которых значительно больше ширины, а ширина значительно больше толщины	—

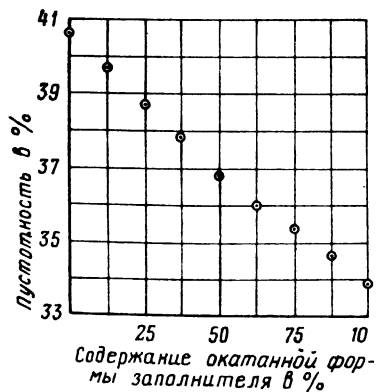


Рис. 3.1. Влияние угловатости зерен заполнителя на его пустотность

больше угловатость заполнителя. Показатель угловатости используемых заполнителей находится в пределах от 0 до 11.

Косвенное доказательство зависимости пустотности от формы зерен заполнителя может быть получено из рассмотрения графика на рис. 3.1, построенного по результатам исследований Шергольда.

Испытываемая проба представляла собой смесь заполнителей двух типов: угловатой и окатанной формы, которые перемешивали в различных соотношениях. Можно видеть, как возрастание количества зерен окатанной формы в пробе снижает пустотность заполнителя.



Другим показателем формы зерна крупного заполнителя является степень его сферичности, которая может быть выражена отношением поверхности зерна к его объему. Степень сферичности зерен определяется характером напластования и спайности исходной горной породы; при получении заполнителя из естественного камня; на степень сферичности зерен также влияет тип применяемого дробильного оборудования. Зерна, которые характеризуются высоким значением отношения поверхности зерна к его объему, способствуют снижению удобоукладываемости бетонной смеси. К зернам этого типа относят зерна пластинчатой и игловатой формы, которые отрицательно влияют на долговечность бетона, так как склонны располагаться ориентированно в одной плоскости с образованием при этом под ними пустот, заполненных водой или воздухом.

Присутствие в крупном заполнителе зерен лещадной (пластинчатой) и игловатой формы в количестве более 10—15% (по весу) обычно считают нежелательным, хотя точные ограничения нигде не записаны<sup>1</sup>.

Процентное содержание (по весу) в заполнителе зерен лещадной формы называют показателем пластинчатости заполнителя. Аналогичным образом получил название и показатель угловатости заполнителя. Некоторые зерна являются одновременно и пластинчатыми и игловатыми и, следовательно, включаются в обе категории.

Содержание пластинчатых и игловатых зерен определяют при помощи простых измерительных приборов, описанных в BS 812 : 1960. Отбор этих зерен из пробы заполнителя основан на довольно условном предположении. Считают, что зерно имеет пластинчатую форму, если его толщина составляет менее чем 0,6 от средней крупности фракции, к которой пластинчатое зерно принадлежит. Аналогичным образом зерна, длина которых более чем в 1,8 раза превышает среднюю крупность фракции, считают игловатыми. Средняя крупность фракции определяется как среднее арифметическое размеров отверстий двух ближайших сит, через одно из которых зерна данной фракции проходят, а на втором сите эти зерна остаются, при этом для получения более точных результатов используют нестандартные для заполнителей сита с отверстиями следующих размеров: 50,8; 38,1; 25,4; 12,7; 9,53; 6,35 мм.

Классификация зерен по их текстуре составлена на основе анализа характера поверхности зерен, которая может быть глянцевой или матовой, гладкой или шероховатой и т. д. При этом учитывается и характер шероховатости. Характер поверхности зерен зависит от твердости, крупности зерен, вида пористости исходной горной породы (твердые, плотные и мелкозернистые горные породы обычно имеют гладкую поверхность излома), а также от влияния различных сил, оказывающих воздействие на поверхность зерен. Оценка шероховатости поверхности зерен визуальным способом является достаточно надежной, однако во избежание недоразумений в табл. 3.2 приводится классификация BS 812 : 1960.

Райтом разработан следующий способ измерения шероховатости поверхности. Испытуемое зерно помещают в смолу и при определенном

---

<sup>1</sup> Содержание игловатых и пластинчатых (лещадных) зерен ограничивается стандартами на заполнители и по ГОСТ 10268—62 не должно превышать 15%. (Прим. ред.)

Таблица 3.2. Текстура зерна заполнителей (BS 812 : 1960)

Группа	Текстура поверхности зерен	Характеристика зерен	Примеры
1	Стекловатая	Раковистая (ноздреватая) поверхность излома	Черный мелкозернистый песчаник, стекловидный шлак
2	Гладкая	Окатанные водой зерна или зерна с гладкой поверхностью, образованные в результате излома слоистых или мелкозернистых горных пород	Гравий, кремнистый сланец, кремнистый известняк, мрамор, некоторые риолиты
3	Зернистая	Более или менее однородные округленные зерна	Песчаник, оолит
4	Шероховатая	Зерна с шероховатой поверхностью, образованные при изломе мелко- и среднезернистых горных пород, содержащих трудно различимые кристаллические включения	Базальт, порфиры, известняк, фельзит
5	Кристаллическая	Зерна, содержащие легко различимые кристаллические компоненты	Гранит, габбро, гнейсы
6	Ячеистая и пористая	Зерна с ясно видимыми порами и раковинами	Кирпич, вулканический пепел, шлаковая пемза, клинкер, керамзит

увеличении исследуют границу раздела между зерном и затвердевшей смолой. При этом определяют разность между длиной контура сечения зерна и длиной ломаной прямой, составленной из серии хорд. Эту разность принимают за степень шероховатости. Несмотря на полученные многочисленные результаты, этот метод из-за своей трудоемкости не находит широкого применения.

По-видимому, форма и характер поверхности заполнителя оказывают значительное влияние на прочность бетона, причем на прочность при изгибе это влияние больше, чем на прочность при сжатии. Влияние формы и текстуры является важным особенно у высокопрочных бетонов. В табл. 3.3 приведены некоторые данные Каплана, которые позволяют ориентировочно судить о степени влияния ряда факторов на прочность бетона. Влияние формы и текстуры заполнителя на интенсивность роста прочности бетона еще полностью не изучено, вероятно более шерохова-

Таблица 3.3. Влияние ряда свойств заполнителей на прочность бетона

Свойство бетона	Относительное влияние свойств заполнителя в %		
	форма зерен	текстура зерен	модуль упругости
Прочность при изгибе . . . . .	31	26	43
Прочность при сжатии . . . . .	22	44	34

Примечание. Приведенные значения представляют собой отношение изменений прочностных характеристик, обусловленных влиянием каждого свойства к общим изменениям, вызванным суммарным влиянием всех трех указанных свойств заполнителя. Испытания проведены на трех составах бетона, изготовленных на 13 типах заполнителя.

тая поверхность зерен обеспечивает лучшее сцепление между заполнителями и цементным камнем. Кроме того, большая площадь поверхности угловатого заполнителя способствует возникновению больших сил сцепления.

Форма крупного заполнителя в целом оказывает значительное влияние на удобоукладываемость бетона. На рис. 3.2, воспроизведенном из статьи Каплана, показана зависимость между угловатостью крупного заполнителя и коэффициентом уплотнения приготовленного на нем бетона. Возрастание угловатости заполнителя от минимума до максимума снизило бы коэффициент уплотнения на 0,09, однако практически установить существование четкой зависимости между этими двумя факторами вряд ли возможно, поскольку одновременно и другие свойства заполнителей также влияют на удобоукладываемость бетонной смеси. Судя по экспериментальным данным, текстура зерен не оказывает решающего влияния на удобоукладываемость.

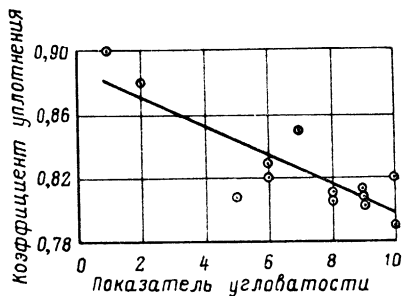


Рис. 3.2. Соотношение между показателем угловатости и коэффициентом уплотнения бетона, приготовленного на заполнителе одного типа

### **СЦЕПЛЕНИЕ ЗАПОЛНИТЕЛЯ С ЦЕМЕНТНЫМ КАМНЕМ**

Сцепление между заполнителями и цементным камнем является важным фактором, влияющим на прочность бетона, особенно при изгибе. Значение сцепления начинают полностью понимать только в настоящее время. Сцепление отчасти объясняется плотным прилеганием и соединением заполнителя и цементного камня, возникающим благодаря

шероховатости поверхности зерен заполнителя. Повышенная шероховатость поверхности зерен, как, например, у дробленых заполнителей, обеспечивает лучшее сцепление; также повышенным сцеплением обычно характеризуются более мягкие, пористые и неоднородные в минералогическом отношении зерна заполнителя. Обычно хорошим сцеплением характеризуются заполнители, характер поверхности которых способствует прониканию цементного теста в глубь зерен. Кроме того, на прочность сцепления влияют и другие физико-химические свойства заполнителя, обусловленные их химико-минералогическим составом и электростатическими условиями на поверхности зерен. Например, некоторое сцепление, вызванное химическими причинами, может возникнуть при использовании в качестве заполнителя известняков; иногда капиллярные силы могут возникать на поверхности отполированных зерен. Однако эти явления изучены мало, поэтому для определения прочности сцепления заполнителя с окружающим его цементным камнем необходимо все еще полагаться на экспериментальные данные.

Определение прочности сцепления заполнителя с цементным камнем является довольно сложным, кроме того, не существует единой установленной методики испытаний. Обычно если сцепление заполнителя с цементным камнем является хорошим, то в испытанных до разрушения бетонных образцах наряду с разрушением по контакту заполнителя и раствора имеются разрушения по зернам заполнителя. Однако чрезмерное количество разрушенных зерен указывает на слишком низкую прочность заполнителя. Следует отметить, что у высокопрочных бетонов прочность сцепления заполнителя с цементным камнем меньше прочности цементного камня при растяжении, поэтому при растяжении разрушение высокопрочных бетонов происходит преимущественно в результате нарушения сцепления между заполнителем и цементным камнем.

### **ПРОЧНОСТЬ ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

Ясно, что прочность бетона при сжатии не может превышать прочности его заполнителя<sup>1</sup>. Однако определить непосредственно фактическую прочность заполнителя при сжатии представляется весьма трудным; необходимые данные обычно получают в результате косвенных определений: прочности при сжатии исходной горной породы на специально изготовленных образцах, показателя дробимости заполнителя в естественном насыпном состоянии и поведения заполнителя в бетоне. Поведение заполнителя в бетоне может быть оценено на основании сопоставления свойств бетона на этом заполнителе и на высококачественном заполнителе, ранее испытанном в бетоне. Если применение испытываемого заполнителя приводит к более низкой прочности бетона при сжатии, а при разрушении многие зерна заполнителя оказываются раз-

---

<sup>1</sup> Это утверждение неверно. Бетон с высокопрочным цементным камнем может иметь прочность более высокую, чем заполнитель. Примером служат конструктивные керамзитобетоны. Получены марки таких бетонов — 400—500, в то время как прочность керамзита существенно меньше [36]. (Прим. ред.)

рушенными, то в этом случае считают, что прочность заполнителя ниже номинальной прочности при сжатии бетона на этом заполнителе. Такой заполнитель может быть использован только в бетонах пониженной прочности.

Недостаточная прочность заполнителя является фактором, ограничивающим прочность бетона. Свойства заполнителя оказывают определенное влияние на прочность бетона даже тогда, когда заполнитель является достаточно прочным. При сравнении бетонов, приготовленных на различных заполнителях, можно отметить, что характер влияния заполнителя на прочность бетона различного состава одинаков при сжатии и растяжении. Возможно, что влияние заполнителя на прочность бетона обусловлено не только механической прочностью заполнителя, но также в значительной степени его способностью к водопоглощению и адгезионными свойствами.

В основном прочность и упругость заполнителя зависит от его состава, текстуры и структуры. Таким образом, низкая прочность бетона может явиться результатом или недостаточной прочности самих зерен заполнителя или, если зерна достаточно прочные, слабого сцепления заполнителя с цементным камнем. Хотя модуль упругости заполнителя определяют редко, он является довольно важной характеристикой. Модуль упругости бетона обычно тем выше, чем выше модуль упругости его заполнителя.

Величина модуля упругости заполнителя влияет также на ползучесть и усадку бетона.

Среднее значение прочности при сжатии исходных горных пород, используемых для приготовления заполнителя, составляет около  $2000 \text{ кгс/см}^2$ , хотя многие заполнители отличного качества получают из горных пород, прочность которых составляет до  $800 \text{ кгс/см}^2$ .

Следует отметить, что прочность заполнителя должна быть значительно выше марки бетона, так как фактические напряжения, возникающие в местах контакта отдельных зерен заполнителя в массе бетона, могут значительно превышать номинальные сжимающие напряжения в бетоне.

В то же время применение заполнителей средних или низких марок с низкими значениями модуля упругости способствует повышению долговечности бетона. Если заполнитель обладает хорошей деформативной способностью, то объемные деформации бетона, происходящие в результате изменения температурно-влажностных условий, сопровождаются пониженными напряжениями в цементном камне.

Таким образом, повышенная деформативность заполнителя уменьшает опасность разрушения бетона, в то время как использование прочного жесткого заполнителя могло бы привести к растрескиванию окружающего заполнителя цементного камня.

Следует отметить, что между прочностью и модулем упругости различных заполнителей не существует четко выраженной зависимости. Например, некоторые граниты имеют модуль упругости  $450 \times 10^3 \text{ кгс/см}^2$ , а габбро и диабаз —  $870 \times 10^3 \text{ кгс/см}^2$ , в то время как прочность этих горных пород изменяется в более узких пределах — от 1480 до

1760 кгс/см<sup>2</sup>. Встречаются породы, модуль упругости которых даже превышает  $1600 \times 10^3$  кгс/см<sup>2</sup>.

Методика определения прочности при сжатии образцов, изготовленных из горной породы, приведена в BS 812: 1960. Для испытаний используют образцы в виде цилиндров диаметром и высотой 2,54 см, высушенные до постоянного веса; предел прочности при сжатии образца вычисляют с точностью до 7 кгс/см<sup>2</sup>. Подготовка образцов включает довольно трудоемкие операции: сверление, пиление и шлифовку. По существу, результаты указанных испытаний характеризуют больше качество исходной горной породы, чем качество заполнителя для бетона. Поэтому в настоящее время предпочитают проводить испытания непосредственно на пробе заполнителя. Испытания на специальном изготовленных образцах являются полезными, особенно при использовании новых видов заполнителей.

Прочность образцов определяют как в сухом, так и в насыщенном водой состоянии. Отношение прочности насыщенных водой образцов к прочности сухих образцов называют коэффициентом размягчения. Считают, что долговечность горных пород, характеризующихся низкими значениями коэффициента размягчения, будет довольно низкой. Определение дробимости заполнителя при сжатии (раздавливании) в цилиндре предусмотрено в BS 812: 1960. Между показателем дробимости и прочностью при сжатии материала математическая зависимость не установлена, однако качественно результаты этих испытаний коррелируют.

Для испытаний заполнителя на дробимость берут пробу материала стандартной фракции 9,53—12,7 мм. При отсутствии пробы данной фракции может быть использован заполнитель других фракций. Однако следует иметь в виду, что при испытаниях пробы заполнителя, который крупнее или мельче стандартной фракции, как правило, получают соответственно повышенный или пониженный показатель дробимости. Перед испытанием пробу заполнителя высушивают до постоянного веса в течение 4 ч при температуре 100—110° С, после чего определенную навеску насыпают в цилиндр и уплотняют по стандартной методике. Затем в цилиндр вставляют плунжер и цилиндр помещают на нижнюю плиту пресса. Давление пресса постепенно повышают в течение 10 мин до тех пор, пока сжимающая нагрузка на пробу заполнителя не достигнет 222 кгс/см<sup>2</sup>. После снятия нагрузки пробу промывают в зависимости от размера испытываемой фракции сквозь сито, размеры отверстий которого указаны в BS 812: 1960. Пробу стандартной испытываемой фракции 9,53—12,7 мм просеивают на британском контрольном сите № 7. Отношение веса материала, прошедшего через соответствующее контрольное сито, к испытываемой навеске заполнителя называют показателем дробимости заполнителя. BS 882: 1954 указывают максимально допустимые значения показателя дробимости, являющиеся средними арифметическими результатов двух параллельных испытаний: 30% для заполнителей, используемых в дорожном бетоне и бетонах, которые в процессе эксплуатации подвергаются истиранию, и 45% для заполнителей, применяемых во всех прочих бетонах. Указанные значения необходимо учитывать при выборе заполнителя, однако следует иметь в ви-

ду, что установление точного соотношения между показателем дробимости и прочностью заполнителя непосредственно в бетоне или прочностью бетона практически невозможно.

В США, где в больших количествах применяют искусственные пористые заполнители, предприняты попытки разработать методику испытаний на прочность пористых заполнителей, аналогичную описанной методике определения показателя дробимости. Определения фактической дробимости малопрочных заполнителей, т. е. заполнителей с показателем дробимости 25—30, встречают некоторые трудности. Это происходит потому, что раздробление слабых зерен происходит в основном до того, как давление на заполнитель достигнет требуемой стандартом величины 40 тс; при этом раздробленные малопрочные зерна уплотняются, что приводит к снижению интенсивности раздробления заполнителя на последних этапах приложения нагрузки. Новый метод испытаний, предусматривающий использование прежней аппаратуры, был включен в переработанное в 1960 г. издание BS 812. Для испытаний берут пробу заполнителя фракции 9,53—12,7 мм и определяют величину нагрузки, под воздействием которой 10% испытываемой навески переходит в раздробленное состояние. При этом, постепенно повышая давление прессы в течение 10 мин, сдавливают заполнитель до погружения плунжера в цилиндр примерно на 15,2 мм для гравия, 20,3 мм для щебня и 24,1 мм для пористых заполнителей (например, вспученного сланца или шлаковой пемзы). В результате раздробления заполнителя, вызванного погружением плунжера на заданную глубину, при просеивании через стандартное сито № 7 проходит 7,5—12,5% испытываемой навески.

Если  $Y$  — фактическое процентное содержание раздробленного материала, полученного в результате воздействия максимальной нагрузки  $X$  тс, то нагрузка, требуемая для получения раздробленного материала в количестве 10% испытываемой навески, может быть вычислена по формуле  $\frac{14X}{Y+4}$ . Следует отметить, что описанный метод в настоящее время применяют все реже и реже<sup>1</sup>.

Можно также определять сопротивление заполнителя удару. Эта характеристика определенным образом связана с показателем дробимости. Для определения сопротивления заполнителя удару берут пробу той же фракции, которую используют и при определении дробимости заполнителя при сжатии в цилиндре. Максимально допустимые значения процентного содержания раздробленных зерен, величина которых после испытаний оказалась меньше размера отверстий британского контрольного сита № 7, для обоих указанных испытаний одинаковы. Ударное воздействие создается с помощью стандартного бойка, падающего 15 раз под действием собственного веса на пробу, насыпанную в цилиндрическую ступку. Это приводит к дроблению пробы аналогично дроблению заполнителя в результате давления на него плунжера в испытаниях заполнителя по определению показателя дробимости. Методика указанных испытаний приведена в BS 812: 1960.

<sup>1</sup> В СССР применяют испытания на раздавливание в цилиндре (см. ГОСТ 9758—61). (Прим. ред.)

**ПРОЧИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

Представляют интерес и некоторые другие механические свойства заполнителя, особенно в тех случаях, когда бетон на этом заполнителе применяют для устройства дорожных покрытий и в конструкциях, подвергаемых в процессе эксплуатации повышенному износу или ударным воздействиям. Сопротивление удару можно определить на образцах цилиндрической формы, изготовленных из исходной горной породы. За показатель сопротивляемости образца удару принимают высоту последнего падения стандартной гири, при которой образец разрушился. Методика испытаний приведена в Технических условиях ASTM D 3—18.

Наряду с прочностью и сопротивлением удару важными свойствами для бетона, применяемого в дорожном строительстве и для устройства полов, являются твердость и истираемость.

Испытания на истираемость проводят на образцах-цилиндрах, аналогичных тем, которые применяли в испытаниях на прочность исходной горной породы при сжатии. Эти образцы истирают с помощью стандартного кварцевого песка на вращающемся металлическом истирающем круге.

*Таблица 3.4. Средние значения механических характеристик различных групп горных пород, встречающихся в Великобритании*

Группа горных пород	Прочность на сжатие в кгс/см <sup>2</sup>	Показатель дробности	Показатель истираемости (на кругах истирания)	Сопротивление удару	Показатель истираемости заполнителя в %		Удельный вес в г/см <sup>3</sup>
					сухого	влажного	
Базальт . . . . .	2039	12	17,6	16	3,3	5,5	2,85
Мелкозернистый песчаник . .	2109	17	19,2	17	3,1	2,5	2,55
Габбро . . . . .	2033	—	18,7	19	2,5	3,2	2,95
Гранит . . . . .	1898	20	18,7	13	2,9	3,2	2,69
Крупнозернистый песчаник . .	2250	12	18,1	15	3	5,3	2,67
Роговик . . . . .	3410	11	18,8	17	2,7	3,8	2,88
Известняк . . . . .	1687	24	16,5	9	4,3	7,8	2,69
Порфир . . . . .	2356	12	19	20	2,6	2,6	2,66
Кварцит . . . . .	3340	16	18,9	16	2,5	3	2,62
Сланец . . . . .	2496	—	18,7	13	3,7	4,3	2,76



Таблица 3.5. Точность результатов испытаний заполнителя

Испытания	Показатель отклонения в %	Количество образцов, обеспечивающее 90% вероятности того, что результат будет отличаться от истинного значения, не более	
		$\pm 3\%$	$\pm 10\%$
Истирание в барабане в сухом состоянии . . . . .	5,7	10	1
То же, в насыщенном водой состоянии . . . . .	5,6	9	1
Истирание на круге . . . . .	9,7	28	3
Определение сопротивления удару изготовленных образцов . . . . .	17,1	90	8
Определение сопротивления удару пробы заполнителя . . . . .	3	—	—
Определение прочности при сжатии	14,3	60	6
Определение дробимости заполнителя . . . . .	1,8	1	—
Истирание в полочном барабане .	1,6	1	—

Показатель истираемости выражают в условных единицах, вычитая из 20 одну треть потери веса испытываемого образца в граммах после истирания. Материал с хорошим сопротивлением истиранию имеет показатель истираемости не менее 17; каменный материал с показателем истираемости менее 14 считают неудовлетворительным.

Данные испытания на истираемость включались в BS 812 вплоть до издания 1951 г. В настоящее время эти испытания не применяют ни в Англии, ни в США. В соответствии с существующей тенденцией испытывать заполнитель в насыщенном состоянии в BS 812:1960 включена новая методика испытаний на истираемость.

В табл. 3.4 приводятся средние значения прочности при сжатии, показателей дробимости, истираемости и сопротивления удару заполнителей из различных групп горных пород, определенных в соответствии с требованиями BS 812:1960. Следует отметить, что значения, указанные для роговика и сланца, получены по результатам испытаний небольшого количества образцов. Приведенные в таблице характеристики этих групп выше, чем они есть на самом деле. Это, по-видимому, объясняется тем, что были испытаны роговики и сланцы только хорошего качества.

Как правило, заполнители из этих горных пород являются непригодными для использования в бетоне. Поэтому и мел не включен в группу известняка, так как он вообще не пригоден в качестве заполнителя для бетона. Что касается прочности при сжатии, то следует иметь в виду, что базальт является очень непостоянной породой. Молодые базальты с небольшим количеством оливина достигают прочности при сжатии до  $4200 \text{ кгс/см}^2$ , в то время как выветрившийся базальт может иметь прочность не более  $1000 \text{ кгс/см}^2$ . Известняк и порфир характеризуются значительно меньшим разбросом значений прочности.

Степень достоверности результатов различных испытаний становится ясной из рассмотрения данных табл. 3.5, в которой указано, какое количество образцов следует испытать для того, чтобы обеспечить 90% вероятности того, что средний результат испытаний образцов находится в пределах  $\pm 3$  и  $\pm 10\%$  истинного значения. Среди всех видов испытаний наиболее достоверны испытания на дробимость заполнителя. С другой стороны, результаты испытаний специально изготовленных образцов характеризуются большими разбросами значений по сравнению с испытаниями проб заполнителя, что, естественно, и следовало ожидать. Результаты различных испытаний, описанных в этом и последующих разделах, характеризуют качество заполнителя, однако на основе выявленных свойств нельзя предсказать возможную прочность бетона и другие свойства бетона, приготовленного на данном заполнителе.

### УДЕЛЬНЫЙ ВЕС

Так как заполнитель обычно содержит как открытые, так и закрытые поры, то значение термина «удельный вес» требует уточнения.

Истинный удельный вес или просто удельный вес учитывает объем материала в абсолютно плотном состоянии (без пор). Следовательно, удельный вес можно выразить как отношение веса абсолютно плотного материала к весу дистиллированной воды равного с материалом объема, взятых при определенной температуре. Для исключения влияния закрытых пор материал должен быть размельчен в порошок. Определение удельного веса является весьма трудоемким. Однако такое определение удельного веса обычно не требуется в технологии бетонных работ.

Кажущийся удельный вес учитывает объем материала вместе с закрытыми, но не капиллярными порами. В этом случае кажущийся удельный вес заполнителя есть отношение навески заполнителя, высушенной до постоянного веса при температуре  $100\text{—}110^\circ\text{C}$  в течение 24 ч, к весу воды, занимающей объем, равный объему материала, включая закрытые поры. Определение кажущегося удельного веса производят при помощи пикнометра, наполняемого водой до определенной метки. Если  $D$  — навеска пробы, высушенной до постоянного веса,  $B$  — вес пикнометра с водой и  $A$  — вес пикнометра вместе с навеской и водой, то вес воды, занимающей объем, равный объему навески пробы, можно выразить как  $B - (A - D)$ . Кажущийся удельный вес вычисляют по формуле

$$\frac{D}{B - A + D} .$$

Пикнометр, используемый в этих испытаниях, представляет собой однолитровый сосуд с металлической завинчивающейся крышкой конической формы, имеющей небольшое отверстие в верхней части. При заполнении пикнометра водой каждый раз получают тот же ее объем.

При подборе состава бетона обычно учитывается заполнитель в насыщенном водой и поверхностно-сухом состоянии, поскольку вода, содержащаяся во всех порах зерен заполнителя, не участвует в химических реакциях твердения цемента и может рассматриваться как часть заполнителя. Таким образом, если  $C$  — навеска насыщенного водой и поверхностно-сухого заполнителя, то общий кажущийся удельный вес вычисляют по формуле  $\frac{C}{B - A + C}$ .

Общий кажущийся удельный вес определяют наиболее часто. Его необходимо знать при расчете выхода бетона или количества заполнителя, требуемого для данного объема бетона. Величина кажущегося удельного веса заполнителя зависит от удельного веса составляющих минералов и пористости горной породы. Большинство природных заполнителей имеет удельный вес 2,6—2,7 (табл. 3.6).

Таблица 3.6. Кажущийся удельный вес различных групп горных пород

Горные породы	Средний удельный вес	Пределы удельных весов
Базальт . . . . .	2,8	2,6—3
Мелкозернистый песчаник . . . . .	2,54	2,4—2,6
Гранит . . . . .	2,69	2,6—3
Крупнозернистый песчаник . . . . .	2,69	2,6—2,9
Роговик . . . . .	2,82	2,7—3
Известняк . . . . .	2,66	2,5—2,8
Порфир . . . . .	2,73	2,6—2,9
Кварцит . . . . .	2,62	2,6—2,7

Нужно отметить, что величина удельного веса заполнителя не является показателем его качества.

### НАСЫПНОЙ ОБЪЕМНЫЙ ВЕС

Известно, что в метрической системе единиц плотность материала численно равна его удельному весу, хотя удельный вес есть безразмерная величина, в то время как плотность выражают в  $г/см^3$ . В английской системе единиц плотность, выражаемую в  $фунт/фут^3$ , можно вычислить путем умножения удельного веса материала на объемный вес воды (равный  $62,4$   $фунт/фут^3$ ).

Следует помнить, что так определяют плотность только отдельных зерен заполнителя. При необходимости дозирования заполнителя по

объему или пересчета расхода материала по весу в количество материала по объему важно знать насыпной объемный вес заполнителя, т. е. вес единицы объема заполнителя в насыпном состоянии (вместе с пустотами).

Беличина насыпного объемного веса заполнителя зависит от того, насколько плотно уложены в массе его зерна. Следовательно, для заполнителя определенного удельного веса его насыпной объемный вес зависит от зернового состава и формы зерен заполнителя. Повышению насыпного объемного веса заполнителя способствует возможность заполнения пустот между крупными зёрнами более мелкими частицами. На плотность укладки зерен в массе заполнителя сильное влияние оказывает форма зерен.

Для крупного заполнителя определенного удельного веса можно сказать, что чем выше его насыпной объемный вес, тем меньше пустот должно быть заполнено цементно-песчаным раствором. Одно время данные испытания по определению насыпного объемного веса использовали в качестве основы при подборе состава бетона.

Получаемое в результате испытаний значение насыпного объемного веса заполнителя зависит не только от различных свойств материала, определяющих возможную пустотность заполнителя, но и от его фактического уплотнения в каждом отдельном случае. Например, если все зерна заполнителя одного размера и имеют сферическую форму, то их наиболее плотная укладка достигается при расположении центров зерен в вершинах воображаемого тетраэдра. В этом случае насыпной объемный вес заполнителя составляет 0,74 от величины удельного веса его зерен. При наиболее свободной укладке зерен их центры располагаются в углах воображаемых кубов, и в этом случае насыпной объемный вес составляет лишь 0,52 от удельного веса зерен заполнителя.

Таким образом, степень уплотнения заполнителя при испытаниях должна быть оговорена техническими условиями. BS 812:1960 предусматривает испытания заполнителя как в рыхлом (неуплотненном), так и в штыкованном (уплотненном) состоянии. Объемный насыпной вес определяют при помощи металлического мерного цилиндра определенных диаметра и высоты, величина которых зависит от наибольшей крупности заполнителя. Для песка используют цилиндры объемом 2,8 л, для крупного заполнителя с наибольшей крупностью не более 38,1 мм используют цилиндр объемом 14,1 л.

При определении насыпного объемного веса в неуплотненном состоянии высушенный до постоянного веса заполнитель осторожно насыпают в мерный цилиндр до образования над верхом цилиндра конуса, который затем снимают вровень с краями сосуда линейкой. Для определения насыпного объемного веса в уплотненном состоянии сосуд наполняют заполнителем в три этапа. На каждом этапе насыпают  $\frac{1}{3}$  требуемого объема материала, который затем штыкуют 25 раз круглым стержнем диаметром 15,9 мм. Избыток заполнителя также удаляют при помощи линейки. Насыпной объемный вес определяют как вес заполнителя, содержащегося в цилиндре, деленный на его объем.

Зная величину кажущегося удельного веса в насыщенном водой

и поверхностно-сухом состоянии  $\rho$ , пустотность заполнителя может быть вычислена по формуле: пустотность равна  $1 - \frac{\text{насыпной объемный вес}}{\rho \cdot 62,4}$ .

Если заполнитель содержит пленочную воду на поверхности, то в результате увеличения его объема он будет уложен менее плотно. Следует учитывать, что полученные в лаборатории значения насыпного объемного веса иногда нельзя непосредственно использовать при пересчете расхода материалов по весу на их расход по объему, поскольку степень уплотнения заполнителя в лаборатории и полевых условиях может быть различной.

### ПОРИСТОСТЬ И ВОДОПОГЛОЩЕНИЕ ЗАПОЛНИТЕЛЯ

Пористость зерен заполнителя уже упоминалась в связи с определением его насыпного объемного веса. Эта характеристика является весьма важной для изучения свойств заполнителя. Пористость заполнителя, его водопроницаемость и водопоглощение оказывают влияние на прочность сцепления заполнителя с цементным камнем, сопротивление бетону попеременному замораживанию и оттаиванию, а также на его химическую стойкость и сопротивление истиранию. От пористости зависит также величина кажущегося удельного веса заполнителя, поэтому выход бетона при одном и том же содержании заполнителя является величиной непостоянной. Размер пор в зернах заполнителя колеблется в довольно широких пределах. Макропоры являются настолько крупными, что они различимы с помощью микроскопа или даже невооруженным глазом. Однако даже самые мелкие поры заполнителя обычно крупнее, чем гелевые поры в цементном камне. Поры размером менее 4 мк представляют особый интерес, поскольку обычно считают, что они влияют на долговечность заполнителей, подвергаемых попеременному замораживанию и оттаиванию.

Некоторые поры заполнителя являются замкнутыми, другие выходят на поверхность зерен. Цементное тесто из-за своей высокой вязкости не может проникнуть на большую глубину даже самых крупных пор заполнителя. При расчете содержания заполнителя в бетоне учитывают общий объем его зерен, которые упрощенно рассматриваются как цельном состоящие из плотного материала. Однако влага может проникать в глубь пор; количество поглощаемой влаги и скорость ее проникания зависят от их размера, протяженности и общего объема пор. Значения пористости некоторых распространенных горных пород приведены ниже.

Горная порода	Пористость в %
Крупнозернистый песчаник . . . . .	0—48
Кварцит . . . . .	1,9—15,1
Известняк . . . . .	0—37,6
Гранит . . . . .	0,4—3,8

Поскольку заполнитель занимает почти  $\frac{3}{4}$  объема бетона, то, очевидно, что общая пористость бетона зависит в значительной степени от пористости заполнителя.

Когда все поры в заполнителе заполнены водой, говорят, что заполнитель находится в насыщенном водой и поверхностно-сухом состоянии. Если заполнитель в этом состоянии поместить в воздушно-сухие условия, т. е., например, в лабораторию, то некоторое количество воды, содержащейся в порах, испарится и заполнитель перейдет в воздушно-сухое состояние.

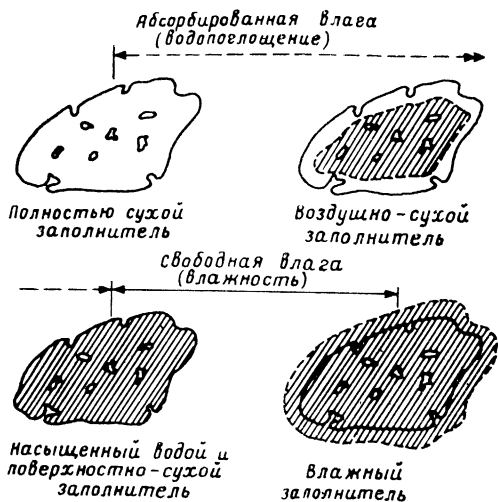


Рис. 3.3. Схема возможного влагосодержания в заполнителе

Длительное высушивание снизило бы влагосодержание заполнителя и привело бы, в конце концов, к полному удалению влаги из заполнителя, т. е. высушиванию до постоянного веса. Эти этапы влагосодержания показаны на рис. 3.3.

Водопоглощение заполнителя характеризуется увеличением веса высушенного до постоянного веса образца после погружения его в воду на 24 ч (поверхностную воду при этом удаляют). Водопоглощение определяется процентным содержанием по весу поглощенной заполнителем воды от веса сухого образца. Стандартная методика определения водопоглощения описана в BS 812:1960.

Следует заметить, что гравий обычно имеет более высокое водопоглощение, чем щебень того же петрографического состава, так как в результате выветривания поверхностного слоя гравия его зерна становятся более пористыми.

Хотя не существует четкой зависимости между прочностью бетона и водопоглощением его заполнителя, однако поры, выходящие на поверхности зерен, влияют на сцепление заполнителя с цементным камнем и могут, таким образом, оказывать некоторое влияние на прочность бетона.

Обычно полагают, что при твердении бетона заполнитель находится в насыщенном водой, но поверхностно-сухом состоянии. При использовании в бетоне заполнителя в сухом состоянии значительное количество воды затворения будет поглощено из бетонной смеси. Следует отметить, что поглощаемая таким образом вода не учитывается, как правило, при расчете водопотребности бетонной смеси. Однако возможно, что при использовании сухого заполнителя его зерна быстро покрываются оболочками из цементного теста, которые препятствуют дальнейшему прониканию воды в глубь зерен, т. е. насыщению заполнителя водой. Это

явление наблюдается главным образом в жирных смесях, в которых происходит быстрое обволакивание заполнителя цементным тестом. В тощих подвижных смесях насыщение заполнителя водой протекает беспрепятственно. На практике на водопоглощение заполнителя в бетонной смеси влияет также последовательность подачи компонентов бетонной смеси в бетоносмеситель.

Поглощение воды заполнителем приводит со временем к некоторому снижению удобоукладываемости, однако примерно через 15 мин это снижение приостанавливается.

Так как водопоглощение сухого заполнителя со временем снижается или совсем прекращается в результате образования на его зернах оболочек из цементного теста, то часто целесообразно определять величину не полного количества поглощаемой воды, а водопоглощения в течение 10—30 мин.

### **ВЛАЖНОСТЬ ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

При рассмотрении кажущегося удельного веса упоминалось, что в бетонной смеси объем, занятый заполнителем, включает суммарный объем всех зерен вместе со всеми их порами. Если требуется исключить отсос воды в заполнитель, то необходимо, чтобы поры были заполнены водой, т. е. заполнитель находился в насыщенном водой состоянии. С другой стороны, любая влага на поверхности заполнителя будет являться добавкой к воде затворения.

Во время дождя заполнитель увлажняется и, за исключением материала, расположенного на поверхности штабелей, удерживает эту влагу в течение длительного времени. Особенно это относится к мелкому заполнителю. Поверхностная (пленочная) или свободная влага, т. е. влага сверх той, которая содержится в заполнителе в насыщенном водой и поверхностно-сухом состоянии, должна быть учтена при расчете состава бетона. Процентное содержание поверхностной влаги в заполнителе от его веса в насыщенном поверхностно-сухом состоянии называют влажностью.

Так как величина водопоглощения соответствует количеству воды, содержащейся в заполнителе, насыщенном водой, но в поверхностно-сухом состоянии, а влажность соответствует количеству поверхностной влаги, то общее содержание воды во влажном заполнителе равняется сумме его водопоглощения и влажности.

Поскольку влажность заполнителя меняется в зависимости от погоды и в значительной мере от того, в какой части штабеля он находится, то величину влажности следует определять довольно часто. Разработано много способов определения влажности. Самый старый способ заключается в определении потери веса пробы заполнителя в результате ее высушивания на противне над источником тепла. При этом необходимо всячески избегать пересушивания. Песок следует сушить до сыпучего состояния, после чего прекратить его подогрев.

В лабораторных условиях влажность заполнителя определяют при помощи пикнометра. Предварительно необходимо определить величину кажущегося удельного веса заполнителя в насыщенном водой и поверх-

ностно-сухом состоянии  $\rho$ . Тогда, если  $B$  — вес пикнометра с водой;  $C$  — вес навески заполнителя в состоянии естественной влажности;  $A$  — вес пикнометра с навеской и водой, влажность заполнителя можно вычислить по формуле

$$W = \left[ \frac{C}{A - B} \left( \frac{\rho - 1}{\rho} \right) - 1 \right] 100.$$

Этот способ испытаний является довольно длительным и требует большой аккуратности в работе, например необходимо полное удаление пузырьков воздуха из пикнометра. Однако он дает весьма точные результаты.

Влажность заполнителя можно также определить, измеряя объем воды, вытесняемый определенным количеством заполнителя. При этом необходимо знать удельный вес породы. Аппаратура, применяемая для этого метода, может быть различной.

Можно определить влажность заполнителя известного удельного веса по величине потери в весе заполнителя при его погружении в воду. Это довольно быстрый способ, он позволяет определять влажность с точностью до 0,5 %.

Разработаны также и другие многочисленные способы определения влажности, например влагу можно удалять путем обжига заполнителя с помощью метилового спирта, при этом измеряют потерю в весе испытываемой пробы. Имеются также патентованные измерительные приборы, принцип работы которых основан на измерении давления газа, возникающего в закрытом сосуде в результате реакции карбида кальция с влагой заполнителя.

Разработаны электрические приборы, позволяющие периодически или непрерывно регистрировать влажность заполнителя в бункере хранения. Принцип работы этих приборов основан на изменении сопротивления или емкости при изменении влажности заполнителя. На некоторых бетонных заводах измерительные приборы этого типа использованы в автоматических устройствах, регулирующих количество воды, вводимое в бетоносмеситель.

Следует отметить, что хотя имеется много различных способов определения влажности заполнителя, однако результаты испытаний будут точными только тогда, когда в них использована правильно отобранная средняя проба. Кроме того, корректирование состава бетонной смеси затрудняет непостоянная влажность заполнителя в различных частях штабеля. Влажность в штабеле изменяется главным образом в вертикальном направлении от высокой влажности внизу штабеля до верхней высыхающей или сухой поверхности. Поэтому необходимо уделять внимание соответствующему хранению заполнителя в штабелях, которые должны снизить колебания влажности до минимума. Предпочтительно хранение в горизонтальных слоях, наличие по крайней мере двух штабелей и обеспечение условий для дренажа влаги в каждом штабеле; не следует использовать донный слой высотой 30 см и т. д. Крупный заполнитель содержит намного меньше воды, чем песок, и характеризуется более постоянными значениями влажности.



Присутствие влаги в заполнителе требует соответствующего корректирования расчетного состава бетона: расход воды в бетонной смеси следует уменьшить на количество свободной влаги в заполнителе, а расход заполнителя необходимо увеличить на аналогичное количество. Свободная влага в песке вызывает к тому же его набухание, т. е. увеличение объема песка в результате образования на поверхности зерен водных пленок, раздвигающих зерна песка. При дозировке материалов по весу набухание не влияет непосредственно на количество. Однако при дозировке материалов по объему набухание песка приводит к уменьшению содержания сухого песка по весу в мерной емкости. В этом случае бетонная смесь становится обедненной песком и «щелбенистой», склонной к расслоению и образованию раковин на поверхности бетона; при этом также снижается выход бетона. Во избежание указанных недостатков следует увеличить объем песка, что компенсирует набухание.

Степень набухания зависит от процентного содержания влаги, присутствующей в песке, и от средней крупности песка. Увеличение объема песка по отношению к объему, занятому насыщенным водой и поверхностно-сухим песком, происходит при повышении влажности песка до 5—8%, при этом максимальное увеличение объема составляет 20—30%. При дальнейшем повышении влажности песка водные оболочки соединяются и вода начинает заполнять межзерновые пустоты. При полном насыщении песка водой его объем сравнивают с объемом сухого песка. Это очевидно из рассмотрения графика на рис. 3.4, на котором показано, что мелкий песок увеличивает объем значительно больше и достигает максимального набухания при более высокой влажности, чем крупный. Особо мелкий песок при влажности 10% разбухает до 40%.

Такой песок в любом случае является непригодным для производства бетона удовлетворительного качества.

Крупный заполнитель характеризуется незначительным увеличени-

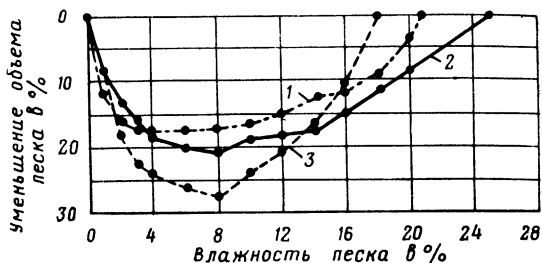


Рис. 3.4. Уменьшение истинного объема песка в результате его набухания при увлажнении (при постоянной объемной дозировке)

песок: 1 — средний; 2 — мелкий; 3 — дробленый



Рис. 3.5. Коэффициент набухания песков с различной влажностью (обозначения те же, что и на рис. 3.4)

ем объема в результате увлажнения, поскольку толщина водных оболочек по сравнению с размером зерен довольно мала.

Так как объем песка при полном его насыщении водой и в сухом состоянии одинаков, то наиболее удобным способом определения степени набухания песка является измерение уменьшения объема данного песка при полном его насыщении водой. Для этого мерный сосуд определенного объема наполняют свободно уложенным влажным песком. Затем сосуд опорожняют и частично наполняют водой. После этого песок снова постепенно загружают обратно в сосуд, при этом для удаления пузырьков воздуха производят его перемешивание и штыкование. Далее измеряют объем песка при полном его насыщении водой  $V_H$ . Если  $V_B$  — первоначальный объем влажного песка, т. е. объем сосуда, то коэффициент набухания вычисляют по формуле

$$K = \frac{V_B - V_H}{V_H}.$$

При дозировании влажного песка по объему следует учитывать его набухание. Объем дозируемого песка нужно умножить на коэффициент набухания  $K$ .

$$1 + \frac{V_B - V_H}{V_H} = \frac{V_B}{V_H}.$$

График изменения коэффициента набухания в зависимости от влажности трех характерных типов песка приведен на рис. 3.5.

Коэффициент набухания можно также определить через насыпные объемные веса сухого  $D_c$  и влажного песка  $D_b$ . Содержание влаги в единице объема песка составит  $\frac{b}{V_B}$ . Тогда коэффициент набухания можно

выразить как  $\frac{D_c}{D_b - \frac{b}{V_B}}$ .

Так как  $D_c$  представляет собой отношение веса сухого песка  $W$  к его насыпному объему  $V_H$  (объемы сухого и полностью насыщенного водой песка одинаковы), то

$$\frac{D_c}{D_b - \frac{b}{V_B}} = \frac{\frac{W}{V_H}}{\frac{W + b}{V_B}} = \frac{V_B}{V_H},$$

т. е. оба значения коэффициента являются идентичными.

### **ВРЕДНЫЕ ПРИМЕСИ В ЗАПОЛНИТЕЛЕ**

Вредные примеси, встречающиеся в заполнителе, можно разделить на следующие три группы: во-первых, загрязнения — примеси, которые препятствуют нормальному процессу гидратации цемента; во-вторых, примеси, образующие на поверхности зерен оболочки, препятствующие

созданию хорошего сцепления между заполнителем и цементным камнем, и, в-третьих, отдельные слабые или дефектные зерна заполнителя. Весь заполнитель или его часть могут оказаться также вредными при возникновении химических реакций между ними и цементным камнем.

### ОРГАНИЧЕСКИЕ ПРИМЕСИ

Природные заполнители могут обладать достаточной прочностью и сопротивлением износу и, несмотря на это, могут оказаться непригодными для бетона в тех случаях, когда они содержат органические примеси, препятствующие гидратации. Органические примеси в заполнителе обычно являются продуктами распада растительных веществ, главным образом дубильной кислоты или ее производных, и встречаются в виде гумуса или органического ила. Органические вещества чаще встречаются в песке, чем в крупном заполнителе, поскольку последний легко промывается.

Не все органические вещества являются вредными, поэтому целесообразно контролировать их действие путем испытаний непосредственно на бетонных кубках. Однако в целях экономии времени следует прежде всего удостовериться, что количество органического вещества превышает установленное допустимое значение. Для этого используют колориметрическую пробу на присутствие органических примесей в заполнителе в соответствии с BS 812: 1960 или ASTM C 40—56T\*.

Если колориметрическая проба покажет присутствие органических примесей, проводится испытание заполнителя в бетоне. Для этого готовят бетонные кубы на испытываемом заполнителе, в котором предполагается повышенное содержание органических примесей, и прочность этих кубов сравнивают с прочностью бетона того же состава, но приготовленного на доброкачественном заполнителе.

В некоторых странах содержание органических примесей в заполнителе определяют по потере в весе пробы в результате ее обработки перекисью водорода.

Интересно отметить, что в ряде случаев воздействие органических примесей может иметь лишь временный характер. В одном из исследований бетон, приготовленный на песке, содержащем органические примеси, имел прочность в возрасте 24 ч, равную 53% прочности аналогичного бетона, приготовленного на чистом песке. В 3-суточном возрасте бетона это соотношение возросло до 82%, в 7-суточном — до 92%, а в 28-суточном возрасте были зарегистрированы равные значения прочности.

### ГЛИНИСТЫЕ, ИЛИСТЫЕ И ПЫЛЕВИДНЫЕ ЧАСТИЦЫ В ЗАПОЛНИТЕЛЕ

Глинистые примеси в заполнителе могут образовать поверхностные оболочки, которые препятствуют нормальному сцеплению между запол-

---

\* Содержание органических примесей в заполнителе определяют для песка по методике ГОСТ 8735—65 и для крупного заполнителя по ГОСТ 8269—64. (Прим. ред.)

нителем и цементным камнем и, следовательно, снижают прочность и долговечность бетона. Кроме глины в заполнителе могут присутствовать и другие мелкодисперсные примеси: ил и пылевидные частицы. Ил — это материал с размером частиц 0,002—0,06 мм. Ил встречается в заполнителях из природных каменных материалов. Каменная пыль — это тонкомолотый материал, образующийся в результате дробления горной породы при получении щебня или в некоторых случаях дробления песка и щебня из гравия. На современных камнедробильных заводах каменную пыль удаляют путем промывки заполнителя водой. Одновременно при изготовлении заполнителя могут удаляться и другие малопрочные загрязняющие примеси. Некоторые примеси образуют оболочки, характеризующиеся хорошим сцеплением с заполнителем, их нельзя удалить промывкой. Если такие оболочки химически устойчивы и не оказывают вредного воздействия на бетон, то применение заполнителя с ними допустимо, хотя в этом случае может оказаться повышенной усадка бетона. Однако заполнители с реакционно-способными оболочками, даже если они физически устойчивы, могут привести к серьезным повреждениям.

Илистые и пылевидные примеси могут образовывать оболочки, аналогичные глинистым оболочкам, или могут быть в виде малопрочных частиц, не связанных с крупным заполнителем. Во втором случае эти примеси не должны присутствовать в повышенном количестве, так как из-за высокой удельной поверхности илистых и пылевидных частиц увеличивается водопотребность бетонной смеси.

В связи с этим необходимо контролировать содержание в заполнителе глинистых, илистых и пылевидных частиц. В BS 882 : 1954 предусматривается, что суммарное содержание этих частиц не должно превышать следующих величин (по весу): 10% для дробленого песка из горных пород, 3% для природного или дробленого из гравия песка и 1% для крупного заполнителя. По стандарту ASTM C 33—57 устанавливаются аналогичные требования, хотя и проводятся различия между бетоном, подвергаемым в процессе эксплуатации истиранию, и другими бетонами. В песках, используемых для приготовления бетона, подвергаемого истиранию, суммарное количество по весу примесей, проходящих через сито № 200, не должно превышать 3% и для прочих бетонов — 5%. Соответствующее допускаемое значение для крупного заполнителя установлено не более 1%.

Техническими условиями предусмотрено содержание глинистых частиц не выше 1% в мелком заполнителе и 0,25% в крупном заполнителе. Следует отметить, что в технических условиях разных стран приводятся различные методы испытаний, поэтому непосредственное сравнение результатов испытаний представляется практически невозможным. Содержание в заполнителе глинистых, илистых и пылевидных частиц определяют методом отмучивания, описанным в BS 812 : 1960\*.

---

\* Содержание глинистых, илистых и пылевидных частиц методом отмучивания определяют по ГОСТу. (Прим. ред.)

## РАСТВОРИМЫЕ СОЛИ

Песок, добываемый с морского берега или из устья реки, содержит соль. Мнения специалистов относительно пригодности такого песка для использования в бетонах расходятся. Самый простой способ очистки песка от солей — это его промывка в пресной воде. Морские пески часто являются чрезвычайно мелкими, поэтому зерновой состав любого вновь используемого песка должен тщательно проверяться.

Если соль не удалена, она будет поглощать из воздуха влагу и вызывать выцветы — неприглядные белые пятна на поверхности бетона. Примеси солей могут также вызывать небольшую коррозию арматуры, однако полагают, что эта коррозия не доходит до опасной степени, особенно в тех случаях, когда бетон высокого качества и когда обеспечивается соответствующий защитный слой арматуры\*.

## СЛАБЫЕ И ВЫВЕТРЕЛЫЕ ЗЕРНА ЗАПОЛНИТЕЛЯ

В ряде случаев испытания обнаруживают присутствие в заполнителе некоторого количества зерен слабых и выветрелых горных пород. Содержание таких дефектных частиц в заполнителе должно быть строго ограничено.

Имеется два распространенных типа дефектных зерен: слабые малопрочные зерна и зерна, увеличивающие свой объем при замораживании или увлажнении, что может привести к разрушению бетона.

Слабыми считают частицы сланца и другие частицы низкой плотности. К ним относят также различные мягкие включения, такие, как комки глины, дерево и уголь, поскольку они вызывают шелушение и образование раковин в бетоне. Содержание слабых частиц свыше 2—5% веса заполнителя может отрицательно влиять на прочность бетона. Присутствие этих частиц недопустимо в бетоне, который по условиям эксплуатации подвергается истиранию.

Уголь является нежелательной примесью, так как он относится к мягким материалам и способен набухать, разрушая бетон. Кроме того, присутствие повышенного количества угля в тонкоизмельченном виде может нарушать нормальный процесс твердения цементного теста. Однако рассредоточенные зерна антрацита в количестве не более чем 0,25% веса заполнителя не оказывают отрицательного влияния на прочность бетона.

Присутствие угля и других материалов низкой плотности можно выявить методом флотации в жидкости соответствующего удельного веса по методике, указанной в стандарте ASTM C 123—57T.

Следует также избегать примесей слюды в заполнителе, так как в присутствии некоторых химически активных продуктов гидратации цемента могут произойти превращения слюды в другие нежелательные

---

\* Содержание хлоридов, во всяком случае, не должно допускаться для конструкций с предварительно напряженной арматурой, при использовании термически упрочненных сталей и проволоочной арматуры [35]. (Прим. ред.)

модификации. Кроме того, в заполнителе не должны присутствовать гипс и другие сульфаты.

Пириты и марказит являются наиболее распространенными примесями в заполнителе, способными вызвать расширение бетона. Эти сульфиды взаимодействуют с водой и кислородом воздуха, образуя сульфат железа, который впоследствии разлагается с образованием гидроокиси, в то время как ионы сульфата взаимодействуют с алюминатами кальция в цементе, в результате чего на поверхности бетона могут появиться пятна и высолы, особенно в теплых и влажных условиях.

Не все виды пиритов являются реакционноспособными. Поскольку разложение пиритов происходит только в известковой воде, можно проверить заполнитель на реакционную способность, поместив материал в насыщенный раствор извести. Если заполнитель является реакционноспособным, то через несколько минут появится зелено-голубой студенистый осадок сульфата железа, а при воздействии воздуха он перейдет в коричневую гидроокись железа. Миджлей обнаружил, что отсутствие реакционной способности связано с присутствием ряда металлических катионов, в то время как отсутствие последних делает пириты активными. Обычно вызывает беспокойство присутствие в заполнителе зерен пиритов размером 4,8—9,5 мм.

Допустимые количества зерен слабых пород и вредных примесей определяются стандартом ASTM C 33—61 и приводятся в табл. 3.7.

Таблица 3.7. Допустимое количество слабых пород в соответствии со стандартом ASTM C 33—61

Примеси	Допустимое содержание в % по весу, не более	
	в мелком заполнителе	в крупном заполнителе
Глина в комках . . . . .	1	0,25
Уголь . . . . .	1	1
Рыхлые зерна . . . . .	—	5
Кремнистый сланец, способный легко разрушаться . . . . .	—	1

Большинство примесей, рассмотренных в данном разделе, встречается в природных отложениях заполнителя и намного реже в дробленном заполнителе.

### **РАВНОМЕРНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМА ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

Под этим термином подразумевают способность заполнителя сопротивляться чрезмерным изменениям его объема, происходящим в результате изменения физических условий. Неравномерность изменения объема следует отличать от расширения, вызываемого химическими реакциями между заполнителем и щелочами в цементе.

Физическими причинами значительных и постоянных изменений

объема заполнителя являются замораживание и оттаивание, температурные деформации при положительных температурах, попеременное увлажнение и высыхание.

Считают, что заполнитель характеризуется неравномерным изменением объема тогда, когда объемные деформации, вызванные вышеупомянутыми причинами, приводят к повреждению бетона, которые могут проявиться в виде местного отслаивания бетона, обширного трещинообразования в поверхностном слое, разрушения бетона на значительную глубину, т. е. повреждения могут отражаться на внешнем виде и представлять собой опасность в конструктивном отношении.

Неравномерность изменения объема встречается у пористых кремнистых сланцев, особенно у легких сланцев с мелкопористой структурой, у некоторых видов глинистых сланцев, у известняков с прослойками набухающей глины и у других пород, содержащих глинистые минералы, в частности монтмориллонитовой и иллитовой групп. Например, обнаружено, что при увлажнении и высыхании относительная деформация модифицированного долерита доходит до 0,0006. В условиях попеременного увлажнения и высыхания бетон на этом заполнителе может разрушиться; то же самое с ним произойдет и при замораживании и оттаивании.

Методика испытаний на равномерность изменения объема заполнителя приводится в Технических условиях ASTM C 88—56T. Пробу фракционированного заполнителя попеременно погружают в раствор сульфата натрия или сульфата магния и высушивают. Образование кристаллов соли в порах заполнителя, подобно воздействию льда, способствует разрушению зерен. Уменьшение размера зерен после ряда циклов воздействия, которое подтверждается анализом зернового состава, характеризует степень неравномерности изменения объема. На основании результатов этих испытаний можно лишь приблизительно предсказать поведение заполнителя в условиях эксплуатации. Однако полученные данные не могут быть использованы для решения вопроса пригодности нового вида заполнителя.

По другой методике заполнитель подвергают определенному количеству циклов попеременного замораживания и оттаивания; иногда эти испытания проводят на растворных или бетонных образцах, изготовленных на заполнителе, требующем проверки. К сожалению, ни один из этих типов испытаний не дает точных данных о поведении заполнителя в реальных условиях температурно-влажностных колебаний при положительной температуре.

Кроме того, не существует таких способов испытаний, которые могли бы удовлетворительно предсказывать долговечность заполнителя в бетоне в условиях его замораживания и оттаивания. Основная причина заключается в том, что поведение заполнителя связано с наличием окружающего его цементного камня, поэтому только наблюдения в процессе эксплуатации бетона могут дать соответствующую оценку долговечности заполнителя.

Тем не менее известно, что определенные заполнители весьма чувствительны к воздействию мороза. Это — пористые кремнистые сланцы,

глинистые сланцы, некоторые виды известняков, в частности слоистые известняки, и некоторые песчаники. Характерным признаком этих горных пород является их высокое водопоглощение, хотя следует отметить, что многие долговечные горные породы также характеризуются высоким водопоглощением (рис. 3.6).

Чтобы произошло разрушение под воздействием мороза, должны создаться критические условия, обусловленные определенным водопоглощением и отсутствием оттока влаги. Создание этих критических условий определяется сечением, формой и степенью непрерывности пор в заполнителе, так как от этих характеристик зависит скорость водопоглощения и количество поглощаемой воды, а также скорость удаления воды из зерен заполнителя.

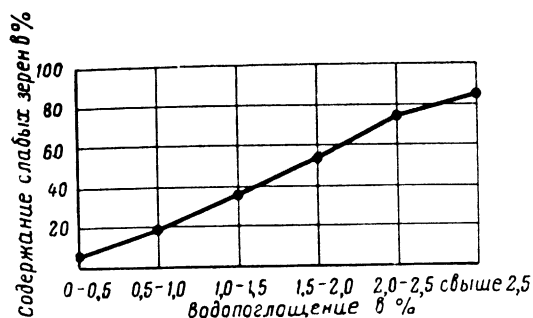


Рис. 3.6. Зависимость водопоглощения заполнителя от содержания в нем зерен слабых горных пород

Выявлено, что наличие пор размером менее 4—5 мк создает критические условия, так как эти поры достаточно велики для впитывания воды, но при таких размерах свободный отток воды под давлением льда затруднен. Давление льда в полностью замкнутом пространстве при температуре  $-20^{\circ}\text{C}$  может

доходить до  $2040 \text{ кгс/см}^2$ . Таким образом, во избежание раскалывания заполнителя и разрушения окружающего цементного камня необходимо обеспечить возможность перемещения воды внутрь зерен заполнителя в направлении незаполненных пор или в окружающий цементный камень, прежде чем гидравлическое давление достигнет критической величины и вызовет разрушение бетона.

Это еще раз говорит о том, что долговечность заполнителя можно полностью оценить только тогда, когда он находится в цементном камне. Зерно может быть достаточно прочным и выдержать давление льда, но его расширение может вызвать разрушение окружающего его раствора.

Уже было сказано, что размер пор — это важная характеристика для оценки долговечности заполнителя. В заполнителях присутствуют, как правило, поры различного размера. Способ количественной оценки структурной пористости разработан Брунауером, Эмметтом и Теллером. Удельную поверхность заполнителя определяют по количеству сорбированного газа, требуемого для образования мономолекулярного слоя на всей внутренней поверхности пор заполнителя. Общий объем пор измеряют методом водопоглощения. Отношение объема пор к их поверхности представляет собой гидравлический радиус пор. Этот показатель, общепринятый в гидравлике при рассмотрении проблем течения жидкостей, дает представление о давлении, необходимом, чтобы вызвать перемещение воды.



В течение последних 20 лет обнаружены некоторые разрушительные химические реакции между заполнителем и окружающим его цементным камнем. Наиболее распространенной является реакция между активными кремнеземистыми составляющими заполнителя и щелочами цемента. Реакционноспособными модификациями кремнезема являются опал (аморфный), халцедон (скрытокристаллический, волокнистый) и тридимит (кристаллический). Эти реакционноспособные минералы встречаются в кремнистых сланцах с включениями опала и халцедона, кремнистых известняках, риолитах и риолитовых туфах, даците и дацитовых туфах, андезите и андезитовых туфах и филлитах. Реакция начинается с взаимодействия щелочных гидроокисей, полученных из щелочей ( $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ ), и кремнеземистых минералов заполнителя. В результате образуется гелеобразное вещество, состоящее из силикатов щелочных металлов, при этом происходит увеличение объема заполнителя.

Гель характеризуется значительной способностью к разбуханию. Он поглощает воду с последующим увеличением своего объема. Так как гель заключен в окружающий его цементный камень, то возникает внутреннее давление, которое в конце концов приводит к возникновению трещин и разрушению цементного камня. По-видимому, расширение вызвано гидравлическим осмотическим давлением, хотя оно может быть также вызвано повышающимся давлением еще твердых продуктов реакции щелочей с кремнеземом. Наиболее разрушительным для бетона является разбухание твердых зерен заполнителя. Некоторая часть мягкого геля выщелачивается водой и откладывается в трещинах, появившихся в результате разбухания заполнителя.

Можно предсказать, что при использовании определенных материалов будет происходить реакция щелочей цемента с заполнителями, но обычно нельзя оценить разрушительное воздействие этого процесса на бетон, зная лишь содержание реакционноспособных материалов. Например, на фактическую реакционную способность заполнителя влияют размер его зерен и пористость, поскольку от них зависит величина площади поверхности заполнителя, на которой может протекать реакция. Хотя содержание щелочей определяется лишь видом цемента, их концентрация на реакционноспособной поверхности заполнителя будет определяться величиной площади этой поверхности. Минимальное содержание щелочей цемента, при котором может быть реакция расширения, составляет 0,6% (в пересчете на эквивалент щелочи  $\text{Na}_2\text{O}$ ). Содержание солей калия пересчитывается на эквивалентное количество  $\text{Na}_2\text{O}$  умножением содержания  $\text{K}_2\text{O}$  в клинкере на коэффициент 0,658. Известно, однако, что в исключительных случаях цементы даже с низким содержанием щелочей вызывают расширение. В определенном диапазоне расширение бетона, приготовленного на реакционноспособном заполнителе, тем больше, чем выше содержание щелочей в цементе, а для данного состава цемента — чем выше его тонкость помола.

Среди других факторов, влияющих на ход реакций щелочей цемента с заполнителем, следует указать присутствие неиспаряющейся воды в цементном камне и степень водопроницаемости цементного камня. В условиях попеременного увлажнения и высыхания наблюдается ускорение реакции. Повышенная температура ускоряет эту реакцию, по крайней мере в диапазоне 10—40°С. Таким образом, можно видеть, что влияние различных физических и химических факторов обуславливает сложность процессов при взаимодействии щелочей цемента с заполнителем. В частности, в результате водопоглощения гель может изменять свою структуру, что приводит к повышению давления, в то время как в других случаях наблюдается диффузия геля из замкнутого пространства.

Поэтому, хотя мы знаем, что некоторые виды заполнителей являются реакционноспособными, не существует простого способа определения того, будет ли такой заполнитель вызывать чрезмерное расширение вследствие реакции с щелочами цемента. Обычно следует полагаться на результаты наблюдений в процессе эксплуатации. Если в вашем распоряжении таких результатов нет, то можно лишь определить потенциальную реакционную способность заполнителя, но не доказать, что реакция будет иметь место. Методика ускоренных химических испытаний приведена в Технических условиях ASTM C 289—57T. Эти испытания позволяют определить уменьшение щелочного содержания нормального раствора NaOH в результате его контакта с тонкоизмельченным заполнителем при температуре 80°С, при этом устанавливают количество растворенного кремнезема. Обычно считают, что разрушительная реакция возможна в тех случаях, когда результаты испытаний ложатся вправо от разделительной линии на графике рис. 3.7.

Из числа физических испытаний по определению реакционной способности заполнителя в США распространены испытания балочек из цементного раствора. Испытываемый заполнитель определенной фракции используют для изготовления специальных балочек из цементно-песчаного раствора с применением цемента с эквивалентным содержанием щелочей не менее 0,8%. Балочки хранят над водой при температуре 37,8°С; при такой температуре расширение проходит более интенсивно, чем при более высоких или низких температурах. Ускорению реакции также способствует использование довольно высокого водоцементного отношения. Подробная методика этих испытаний описана во Временных технических условиях ASTM C 227—58T.

Испытываемый заполнитель считают непригодным для бетона, если его расширение к 6 месяцам составляет более 0,05% и к 1 году твердения — более 0,1%. Если превышено только 6-месячное значение, то полагают, что применение данного заполнителя не приведет к разрушительному расширению.

Установлено, что результаты этих испытаний очень хорошо коррелируют с результатами эксплуатационных наблюдений, хотя требуется значительное время, прежде чем можно будет вынести решение о пригодности заполнителя для бетона. С другой стороны, результаты химических испытаний часто не являются решающими. Аналогичным образом

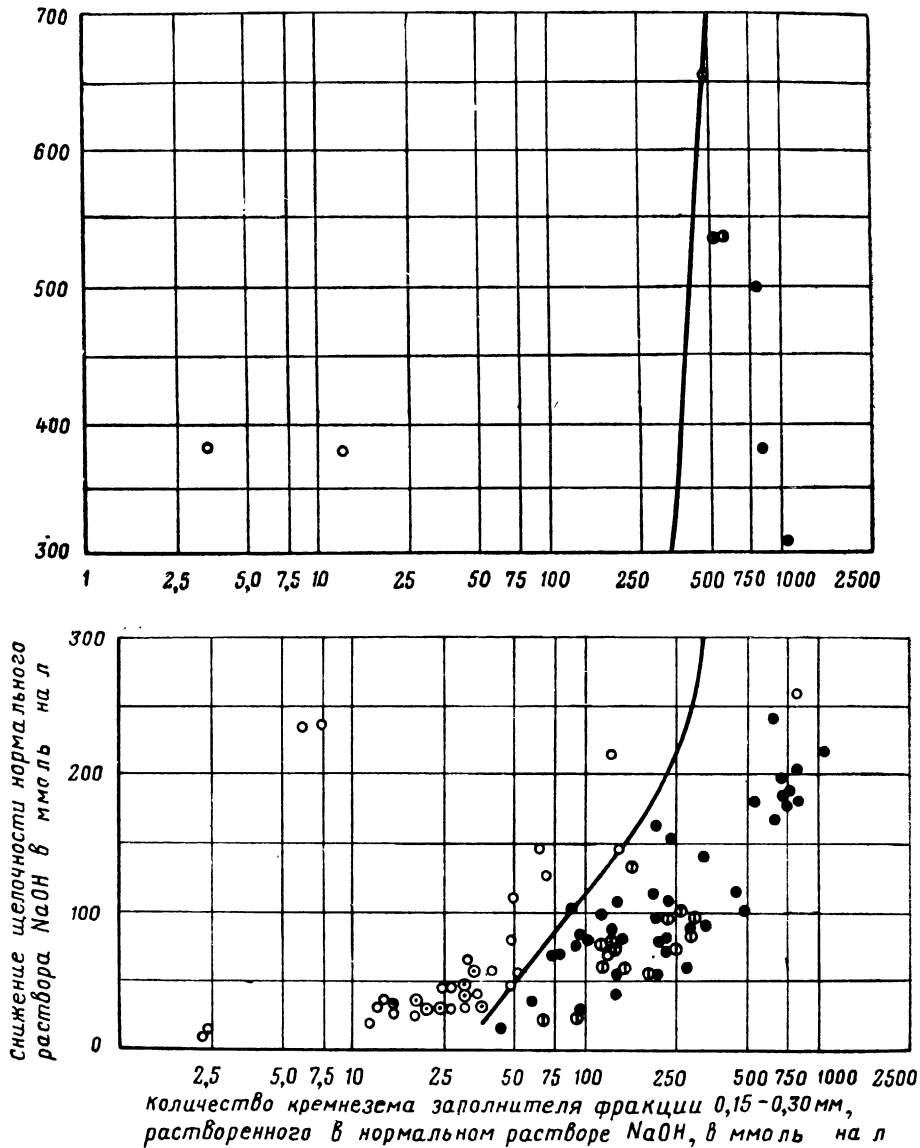


Рис. 3.7. Результаты химических испытаний, проведенных по Техническим условиям ASTM C 289—61

● — заполнители, вызывающие расширение раствора более 0,1% за 1 год при использовании цемента, содержащего 1,38% щелочей; ○ — заполнители, вызывающие расширение раствора менее 0,1% за 1 год при тех же условиях; ⊙ — заполнители, для которых нет данных о вызываемом ими расширении раствора, однако петрографический анализ выявил разрушительный характер этих заполнителей; ⊙ — заполнители, для которых нет данных о вызываемом ими расширении раствора (петрографический анализ выявил безвредный характер этих заполнителей)

петрографический анализ, хотя и является полезным для определения минералогического состава, не позволяет установить, приведет ли присутствие соответствующего минерала в заполнителе к аномальному расширению. Таким образом, быстрый и надежный способ испытаний по определению реакционной способности заполнителя, должен быть еще разработан.

Установлено, что расширение вследствие реакции щелочей цемента с заполнителем может быть уменьшено или исключено совсем путем введения в бетонную смесь реакционноспособного кремнезема в тонкоизмельченном виде. Этот кажущийся парадокс можно объяснить с помощью данных, приведенных на рис. 3.8, на котором показана зависимость

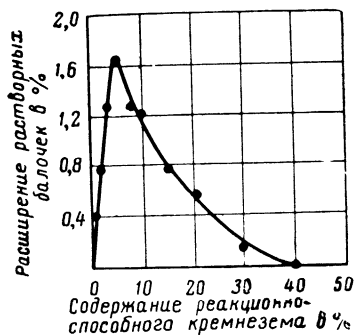


Рис. 3.8. Расширение раствора за 224 суток в зависимости от содержания реакционноспособного кремнезема в заполнителе

величины расширения растворных балочек от содержания реакционноспособного кремнезема с тонкостью измельчения, соответствующей размерам отверстий сит, от 18 до 52, т. е. не в порошкообразном виде. В области низкого содержания кремнезема повышение количества кремнезема при определенном содержании щелочей приводит к увеличению расширения, однако при более высоких значениях кремнезема положение меняется; чем больше поверхность реакционноспособного заполнителя, тем меньше количество щелочей, приходящихся на единицу поверхности, и тем меньше образуется щелочесиликатного геля. С другой стороны, благодаря чрезвычайно низкой подвижности гидроокиси кальция в реак-

ции участвует только гидроокись кальция, которая непосредственно контактирует с поверхностью заполнителя. Поэтому количество гидроокиси кальция, приходящейся на единицу поверхности заполнителя, не зависит от величины общей площади поверхности заполнителя. Таким образом, увеличение площади поверхности приводит к повышению соотношения между гидроокисью кальция и щелочами в растворе в контактном слое заполнителя. В таких условиях образуется безвредный нерасширяющийся щелочной силикат кальция. Добавка тонкомолотого кремнеземистого материала к крупным реакционноспособным зернам уменьшает расширение.

Установлено, что активные минеральные добавки, такие как дробленое стекло пирекс или зола-унос, являются эффективными средствами для уменьшения проницаемости зерен крупного заполнителя. При достаточном количестве добавленного кремнезема в результате первоначальной реакции понижается концентрация щелочей до концентрации, получаемой на низкощелочном цементе при отсутствии в последнем добавок. Однако важно, чтобы было добавлено достаточное количество тонкомолотого кремнезема. Обычно рекомендуют введение 20 г реакционноспособного кремнезема на каждый грамм щелочей сверх 0,5% веса цемента.

В Кингстоне (Онтарио) наблюдали еще один тип коррозионного процесса, который протекал между заполнителем из глинистого доломитизированного известняка и цементом в щелочной среде. Эта реакция между карбонатным заполнителем и цементом еще недостаточно изучена. В частности, пока не ясна роль глины, но, по-видимому, ее присутствие оказывает определенное влияние на процесс расширения.

### **ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

Эксплуатационные качества бетона зависят от следующих трех термических характеристик заполнителя: температурного расширения, удельной теплоемкости и теплопроводности. Два последних свойства имеют важное значение для массивных бетонных сооружений и теплоизоляционных конструкций, но не для обычных бетонных конструкций. Эти свойства рассматриваются в разделе термических свойств бетона.

Коэффициент температурного расширения заполнителя влияет на величину коэффициента температурного расширения бетона, приготовленного на данном заполнителе. Чем выше этот показатель у заполнителя, тем выше он у бетона, но следует помнить, что коэффициент температурного расширения бетона зависит также от содержания заполнителя в бетонной смеси и состава бетонной смеси в целом.

Есть и другой аспект этой проблемы. Предполагают, что если коэффициенты температурного расширения заполнителей и цементного камня в значительной степени отличаются друг от друга, то большие температурные колебания могут вызвать неодинаковые температурные деформации составляющих бетона, что нарушит сцепление между зёрнами заполнителя и окружающим его цементным камнем.

Однако поскольку появление различных по своей величине деформаций составляющих бетона обуславливается также и влиянием других факторов, например усадкой цементного камня, то при обычных температурах в пределах 4—60°С различия в значениях коэффициента температурного расширения заполнителя и цементного камня могут и не вызывать разрушения бетона. Тем не менее, когда значения этого коэффициента для заполнителя и цементного камня отличаются более чем на  $5,4 \times 10^{-6}/град$ , это оказывает отрицательное влияние на долговечность бетона, эксплуатируемого в условиях попеременного замораживания и оттаивания.

Коэффициент температурного расширения можно определить с помощью dilatометра, разработанного Фербеком и Хассом для мелкого и крупного заполнителей. Коэффициент линейного температурного расширения заполнителя зависит от типа исходной горной породы. Для наиболее распространенных горных пород он находится в диапазоне от  $0,9 \times 10^{-6}/град$  до  $16 \times 10^{-6}/град$ , однако для большей части заполнителей — в пределах  $(5,4—12,6) \times 10^{-6}/град$  (см. табл. 3.8). Коэффициент линейного температурного расширения портландцементного камня колеблется от  $10,8 \times 10^{-6}/град$  до  $16,2 \times 10^{-6}/град$ , хотя в отдельных случаях были отмечены значения до  $20,7 \times 10^{-6}/град$ .

Таблица 3.8. Коэффициенты линейного температурного расширения различных горных пород

Горная порода	Коэффициент линейного температурного расширения в $1 \times 10^{-6} / \text{град}$
Гранит . . . . .	1,8—11,9
Диорит, андезит . . . . .	4,1—10,3
Габбро, базальт, диабаз . . . . .	3,6—9,7
Песчаник . . . . .	4,3—13,9
Доломит . . . . .	6,7—8,6
Известняк . . . . .	0,9—12,2
Кремнистый сланец . . . . .	7,4—13,2
Мрамор . . . . .	1,1—16

Величина коэффициента зависит от степени насыщения материала водой. Таким образом, значительные различия в коэффициентах температурного расширения между составляющими бетона встречаются только в случае использования заполнителей, характеризующихся очень низким температурным расширением. К числу таких заполнителей относятся некоторые разновидности гранитов, известняков и мрамора.

Если ожидается воздействие на бетон высоких или низких температур, то должно быть изучено поведение заполнителя в данном температурном интервале. Например, в результате фазовых превращений, происходящих в кварце при температуре  $573^{\circ}\text{C}$ , его объем мгновенно увеличивается на 0,85%. Это могло бы привести к разрушению бетона, поэтому жаростойкие бетоны никогда не приготавливают на кварцевом заполнителе.

### СИТОВОЙ АНАЛИЗ<sup>1</sup>

Ситовой анализ представляет собой простую операцию рассеивания пробы заполнителя на фракции, каждая из которых состоит из зерен одинакового размера. Точнее, каждая фракция содержит зерна, размер которых колеблется в определенных пределах, соответствующих размерам отверстий стандартных сит.

Стандартные сита, используемые при просеивании заполнителей для бетона, имеют квадратные отверстия. Характеристики этих сит приведены в BS 410:1943.

Сита с отверстиями размером менее 4,76 мм обычно изготовлены из проволоочной сетки, хотя в некоторых случаях сетка может быть использована и для сит с отверстиями размером до 12,7 мм. Проволочную

<sup>1</sup> Английские и американские стандарты дают размеры зерен заполнителя в дюймах, что при переводе в метрическую систему мер создает определенные неудобства. Мы сочли все же возможным и необходимым сохранить приведенные в книге данные, так как они не поддаются переработке для выражения в метрической системе, в то же время они представляют большой интерес, так как показывают, какое значение для повышения качества бетона имеет подбор зернового состава заполнителя.

Таблица 3.9. Перечень стандартных сит

Британский стандарт		По Тейлору		Американский стандарт*	
№ сита	внутренний размер отверстий в мм	№ сита	внутренний размер отверстий в мм	№ сита	внутренний размер отверстий в мм
1	2	3	4	5	6
350	0,043	400 325	0,038 0,043	400 325	0,038 0,044**
300	0,053	270	0,053	270	0,053
240	0,066	250	0,061	230	0,063**
200	0,076***	200	0,074	200	0,074
170	0,089	170	0,089	170	0,089**
150	0,104	150	0,104	140	0,105
120	0,125	115	0,125	120	0,125**
100	0,152***	100	0,147	100	0,149
85	0,178	80	0,175	80	0,177**
72	0,211	65	0,208	70	0,21
60	0,251	60	0,246	60	0,25**
52	0,295***	48	0,295	50	0,297
44	0,353	42	0,351	45	0,354**
36	0,422	35	0,417	40	0,42
30	0,5	32	0,495	35	0,5**
25	0,599***	28	0,589	30	0,595
22	0,698	24	0,701	25	0,707**
18	0,853	20	0,833	20	0,841
16	1,003	16	0,991	18	1**
14	1,204***	44	1,17	16	1,19
12	1,404	12	1,4		1,41**
10	1,676	10	1,65	12	1,68
8	1,057	9	1,98	10	2**
7	2,41***	8	2,36	8	2,38
6	2,812	7	2,79	7	2,83**

Британский стандарт		По Тейлору		Американский стандарт*	
№ сита	внутренний размер отверстий в мм	№ сита	внутренний размер отверстий в мм	№ сита	внутренний размер отверстий в мм
1	2	3	4	5	6
5	3,35	6	3,33	6	3,35
		5	3,96	5	4**
		4	4,7	4	4,76
3/16"	4,76***	3,5	5,61	3,5	5,66**
1/4"	6,35	3	6,68	3 1/2	6,73
5/16"	7,94	2,5	7,92	7,94	8**

\* По стандарту ASTM E 11—60Т предусматривается, что размер отверстий, если он превышает 1 мм, указывается в мм, а если он менее 1 мм, то в мк.

\*\* Сита, которые Международная организация стандартизации считает основными ситами международного стандарта.

\*\*\* Британские контрольные сита, используемые для определения зернового состава заполнителя.

сетку изготавливают из фосфористой бронзы, для крупных сит могут быть использованы латунь и мягкая сталь. Отношение суммарной площади отверстий к общей площади поверхности сита находится в пределах 35—44%. Для сит с отверстиями размером 4,76 мм и крупнее, изготовленных с использованием дырчатых пластинок из мягкой стали, этот показатель составляет 64%.

Стандартные сита имеют соответствующее обрамление, которое позволяет собирать сита в колонку. Сита располагают одно над другим таким образом, чтобы самое крупное сито было наверху. Остаток материала на каждом сите после просеивания представляет собой фракцию заполнителя крупнее, чем размер отверстий данного сита, но мельче, чем размер отверстий вышележащего сита. Следует помнить, что размер зерен 4,76 мм (американское стандартное сито № 4) является значением, которое делит заполнитель на мелкий и крупный.

Для ситового анализа заполнителя используют стандартный набор контрольных сит, в котором внутренний размер отверстий любого сита составляет точно половину внутреннего размера отверстий вышележащего более крупного сита.

К контрольным ситам для заполнителей по британскому стандарту относят сита с отверстиями диаметром 76,2; 38,1; 19,05; 9,52; 4,76 мм и с сетками № 7, 14, 25, 52, 100 и 200\*.

Для отделения особо крупных и особо мелких фракций, а также в исследовательской работе по изучению зернового состава заполнителя

\* Номер сита обозначает число отверстий на линейный дюйм.



используют и другие дополнительные сита. В табл. 3.9 приведен перечень сит по британскому стандарту, американскому стандарту (ASTM) и по Тейлору.

Перед проведением ситового анализа пробу заполнителя высушивают на воздухе во избежание образования комков из мягких пород и для предохранения от залипания сит с мелкими отверстиями. Рекомендованные BS 812 : 1960 минимальные веса сокращенной пробы для просеивания приведены ниже.

Наибольшая крупность заполнителя в мм	Минимальный вес пробы в кг
63,5	50,8
50,8	36,3
38,1 или 31,7	15,9
25,4	4,5
19,05 или 15,9	2,27
12,7	1,13
9,52	0,45
6,35	0,23
4,76	0,23
Проходит через сито № 7	0,11

Просеивание можно производить вручную, однако в лабораторных условиях применяют преимущественно механическое просеивание.

Результаты ситового анализа лучше всего оформить в виде таблицы, как это показано в табл. 3.10.

Таблица 3.10. Пример оформления результатов ситового анализа

Британское контрольное сито	Частные остатки на ситах в г	Частные остатки на ситах в %	Прошло через сита в %	Полные остатки на ситах в %
1	2	3	4	5
9,52 мм	0	0	100	0
4,76 »	6	2	98	2
№ 7	31	10,1	88	12
№ 14	30	9,8	78	22
№ 25	59	19,2	59	41
№ 52	107	34,9	24	76
№ 100	53	17,3	7	93
Меньше № 100	21	6,8	—	—

Далее вычисляют полное количество заполнителя, проходящего при просеивании через каждое сито (графа 4). Процентное содержание этого количества заполнителя используют для построения кривой зернового состава заполнителя.

Результаты определения зернового состава наиболее удобно изображать графически в виде кривой просеивания. Графики зернового состава заполнителя позволяют с первого взгляда оценить, отвечает ли зерновой состав испытываемой пробы требованиям технических условий, является ли он слишком крупным или слишком мелким и каких фракций недостаточно в заполнителе.

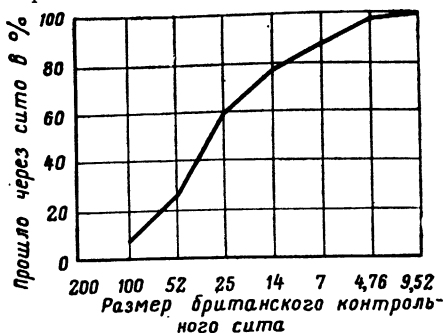


Рис. 3.9. Пример кривой зернового состава заполнителя

Рис. 3.9, построенного по данным табл. 3.15.

### **МОДУЛЬ КРУПНОСТИ**

Модуль крупности<sup>1</sup> вычисляют на основе результатов ситового анализа как частное от деления на 100 суммы полных остатков на всех контрольных ситах стандартного набора (№ 100, 52, 25, 14, 7) и ситах с отверстиями размером 4,76 мм и более, вплоть до самого крупного требуемого сита. Модуль крупности тем больше, чем больше размер зерен заполнителя. Следует помнить, что если крупность всех зерен в испытываемой пробе; если он превышает, например, размер отверстий сита № 25, то полный остаток на ситах № 52 и 100 должен составить 100%. Однако ясно, что один параметр, даже средний, не может представлять зерновой состав заполнителя, поскольку одним и тем же модулем крупности может характеризоваться бесконечное количество в сущности различных зерновых составов заполнителя. Следовательно, модуль крупности не может полностью характеризовать зерновой состав заполнителя, однако это характеристика является полезной при ежедневном контроле за зерновым составом заполнителей, которые берутся из постоянного источника.

### **ТРЕБОВАНИЯ К ЗЕРНОВОМУ СОСТАВУ ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

Мы уже выяснили, как определить зерновой состав заполнителя, но нам еще остается определить, удовлетворяет ли полученный зерновой

<sup>1</sup> Модуль крупности является условной величиной и характеризует зерновой состав только совместно с данными ситового анализа, так как одно и то же значение модуля крупности может быть получено для разных соотношений фракции. (Прим. ред.)

состав требованиям технических условий. Каковы же признаки кривой рационального зернового состава?

Так как прочность бетона в уплотненном состоянии с заданным водоцементным отношением не зависит от зернового состава заполнителя, то зерновой состав является важным лишь постольку, поскольку он влияет на удобоукладываемость бетонной смеси. Интенсивность нарастания прочности бетона, соответствующая данному водоцементному отношению, требует полного уплотнения бетонной смеси, которое в свою очередь может быть достигнуто только на достаточно удобоукладываемой смеси. Поэтому необходимо готовить такую бетонную смесь, которая может быть максимально уплотнена с умеренными затратами труда.

Следует отметить, что существует множество кривых рациональных зерновых составов заполнителя. Помимо физических требований не следует забывать и об экономических соображениях, а именно бетон должен быть приготовлен на дешевых материалах, поэтому нецелесообразно предъявлять жесткие требования к зерновому составу заполнителя.

Считают, что основными факторами, определяющими зерновой состав заполнителя, являются: удельная поверхность заполнителя, которая определяет количество воды, расходуемое на увлажнение поверхности зерен; относительный объем заполнителя, занимаемый его зернами; удобоукладываемость бетонной смеси и склонность к расслоению.

Следует отметить, что требования удобоукладываемости бетонной смеси и нерасслаиваемости в некоторой степени противоречивы. Чем легче происходит плотная укладка зерен различного размера, т.е. размещение мелких зерен в пустотах между более крупными зернами, тем легче такие мелкие зерна могут выделяться из этих пустот. В правильно составленной бетонной смеси не следует допускать, чтобы раствор отделялся от крупного заполнителя.

Для фракционированного заполнителя необходимо, чтобы промежутки в нем были достаточно малыми, чтобы цементное тесто не вытекло и не было расслоения смеси.

Имеется еще одно условие для получения бетонной смеси с удовлетворительной удобоукладываемостью: смесь должна содержать достаточное количество материала, проходящего через сито № 52. Так как в этот материал входят также зерна цемента, то для получения удобоукладываемых жирных смесей требуется более низкое содержание мелкого песка, чем для тощих смесей. Если в зерновом составе песка недостаточно мелких зерен, то увеличение соотношения между мелким и крупным заполнителем не исправит положения, а вызовет избыток зерен среднего размера, что может привести к повышению жесткости бетонной смеси. Бетонная смесь будет иметь повышенную жесткость, если фракция какого-либо размера присутствует в избытке. Необходимое содержание достаточного количества мелких, но прочных зерен достигается в данном примере зернового состава минимальным количеством зерен, проходящих сквозь сито № 52, а иногда и сито № 100, как это показано в табл. 3. 20 и 3. 21.

Требование, чтобы заполнитель занимал максимально возможный относительный объем бетона, прежде всего объясняется экономическими соображениями, поскольку заполнитель дешевле цемента. Однако применение слишком жирных смесей является нежелательным и по ряду технических причин. Считают, что чем большее количество заполнителя уложено в заданный объем бетона, тем выше прочность бетона. Результаты исследований показывают, что максимальная плотность

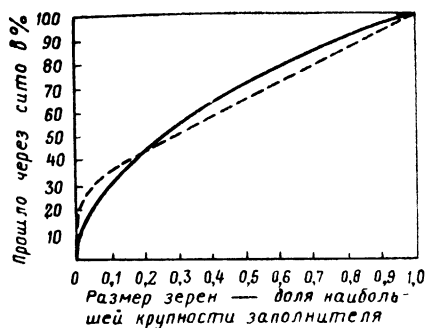


Рис. 3.10. Кривые зернового состава заполнителя по Фуллеру

обеспечивается кривыми зернового состава полностью параболической формы или в начальной части параболической, а затем прямой при построении в обычном масштабе, как показано на рис. 3.10. Однако замечено, что использование заполнителя, фракционированного в соответствии с условиями получения максимальной плотности, приводит часто к получению жесткой и даже неудобноукладываемой бетонной смеси. Удобноукладываемость повышается при некотором избытке теста сверх количества, требуемого для заполнения пустот в песке, а также при

избытке цементно-песчаного раствора сверх количества, требуемого для заполнения пустот в крупном заполнителе.

Рассмотрим роль удельной поверхности заполнителя. Водоцементное отношение в бетонной смеси обычно устанавливают исходя из требуемой прочности. В то же время количества цементного теста должно быть достаточно для покрытия поверхности всех зерен. Поэтому с уменьшением удельной поверхности заполнителя снижается расход теста и, следовательно, водопотребность бетонной смеси.

Если в упрощенном виде в качестве показателя формы заполнителя взять сферу диаметром  $D$ , отношение площади поверхности зерна к его объему составит  $\frac{6}{D}$ . Это отношение поверхности зерен к их объему или,

если зерна характеризуются постоянным удельным весом, к их весу называют удельной поверхностью заполнителя. Для зерен другой формы был бы получен показатель, отличный от величины  $\frac{6}{D}$ , хотя площадь поверхности зерен будет обратно пропорциональна размеру зерен, что очевидно из рис. 3.11. Следует отметить, что логарифмический масштаб на графике использован как для оси ординат, так и для оси абсцисс.

У фракционированного заполнителя зерновой состав и общая удельная поверхность связаны друг с другом, хотя имеется множество кривых зернового состава, соответствующих одной и той же удельной поверхности. При увеличении наибольшей крупности заполнителя общая удельная поверхность зерен и водопотребность смеси уменьшаются.

ся, однако эта зависимость не является линейной. Например, возрастание наибольшей крупности заполнителя с 9,52 до 63,5 мм может в определенных условиях снизить водопотребность бетонной смеси при сохранении той же удобоукладываемости на 50 л/м<sup>3</sup> (рис. 3.12). При этом водоцементное отношение можно соответственно снизить на 0,15.

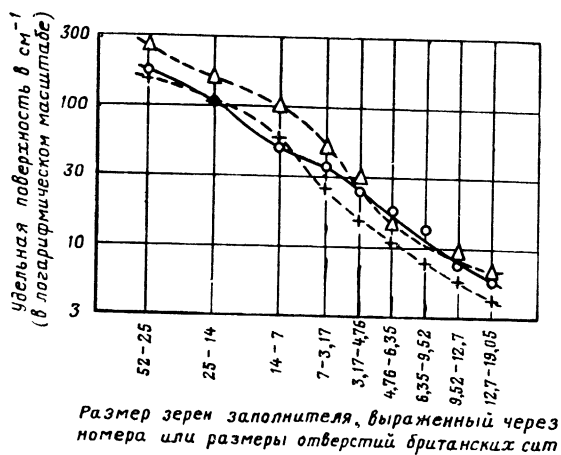


Рис. 3.11. Зависимость между удельной поверхностью и размером зерен заполнителя

△ — дробленый гравийный щебень; ○ — гравий неправильной формы; + — окатанный гравий

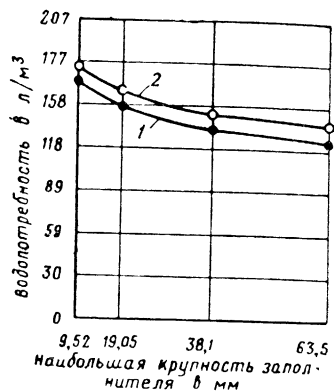


Рис. 3.12. Влияние наибольшей крупности заполнителя на водопотребность бетонной смеси при постоянной величине осадки конуса

1 — заполнитель А; 2 — заполнитель В

Практические ограничения наибольшей крупности заполнителя, проводимые в тех или иных условиях, и влияние величины наибольшей крупности заполнителя на прочность бетона будут рассмотрены далее.

Выбрав наибольшую крупность заполнителя и его зерновой состав, мы можем выразить общую площадь поверхности зерен, используя удельную поверхность в качестве параметра. Именно общая поверхность заполнителя определяет водопотребность и удобоукладываемость бетонной смеси. Впервые подбор состава бетона на основе удельной поверхности заполнителя был предложен Л. Н. Эдвардсом в 1918 г. Интерес к этому методу недавно возобновился. Удельную поверхность можно определить с помощью метода водопроницаемости, однако простого способа испытаний в полевых условиях пока не предложено. Математический метод встречает определенные трудности из-за непостоянства формы различных зерен заполнителя.

Однако это не единственная причина того, почему проектирование состава бетона на основе удельной поверхности заполнителя не получило всеобщего признания. Было выявлено, что вычисление площади поверхности не представляется возможным для зерен заполнителя более мелких, чем размер отверстий британского сита № 100, и для цемента. По-видимому, эти частицы, а также некоторые более крупные зерна

песка выполняют в бетонной смеси роль смазки и не требуют такого же увлажнения, как крупные зерна. Это подтверждается некоторыми результатами исследований, проведенных Глэнвиллем, Коллинзом и Мэттьюзом (см. табл. 3.11).

Таблица 3.11. Водоцементное отношение, требуемое для получения заданной удобоукладываемости

Кривая зернового состава	Содержание каменной пыли в заполнителе в %	Водоцементное отношение для получения смеси с удобоукладываемостью		
		низкой	средней	высокой
1	0	0,612	—	—
	3	0,618	—	—
	6	0,634	—	—
	9	—	0,7	0,75
	12	—	0,73	0,76
2	0	0,63	—	—
	3,5	0,635	0,715	—
	7	0,648	0,715	0,75
	10,5	0,653	0,72	0,745
	14	—	0,72	0,75
3	0	0,665	0,735	0,78
	4,2	0,655	0,725	0,758
	8,4	0,682	0,735	0,766
	12,6	0,695	0,74	0,77
	16,8	0,74	0,775	0,79
4	0	0,713	0,78	0,82
	4,8	0,72	0,787	0,825
	9,6	0,732	0,787	0,825
	14,4	0,765	0,805	0,83
	19,2	0,807	0,835	0,85

Так как удобоукладываемость зависит от удельной поверхности, Мэрдок предложил в расчетах пользоваться эмпирическим коэффициентом удельной поверхности. Значение этого коэффициента, а также относительные значения удельной поверхности приведены в табл. 3.12.

Для определения общего влияния площади поверхности заполнителя определенного зернового состава процентное содержание по весу каждой фракции заполнителя умножают на величину коэффициента удельной поверхности соответствующей фракции, после чего полученные для каждой фракции значения суммируют. С другой стороны, Дэви нашел, что при одной и той же удельной поверхности заполнителя водопотребность и прочность бетона при сжатии являются одинаковыми для довольно широкого диапазона зерновых составов заполнителя. Это относится как к зерновому составу со всеми требуемыми фракциями, так и к зерновому составу с пропуском некоторых фракций. Три из че-

Таблица 3.12. Относительные значения удельной поверхности и коэффициент удельной поверхности по Мэрдоку

Размер фракции заполнителя в мм или № британского сита	Относительное значение удельной поверхности	Коэффициент удельной поверхности
38,1—76,2	0,5	0,5
19,05—38,1	1	1
9,53—19,05	2	2
4,77—9,53	4	4
№ 7—4,77	8	8
№ 7—14	16	12
№ 14—25	32	15
№ 25—52	64	12
№ 52—100	128	10
Меньше № 100	—	1

Таблица 3.13. Характеристика бетонов, приготовленных на заполнителях с одинаковой удельной поверхностью

Обозначение зернового состава заполнителя	Зерновой состав заполнителя в % (размер фракций выражен в мм или через № сита)						
	№ 52—100	№ 25—52	№ 14—25	№ 7—14	№ 7—5,77	№ 4,77—3,53	№ 9,53—19,05
A	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	22	22
B	12,9	12,9	12,9	0	0	30,6	30,7
C	15,4	15,4	0	0	0	34,6	34,6
D	25,4	0	0	0	0	0	74,6

Продолжение табл. 3.13

Обозначение зернового состава заполнителя	Удельная поверхность в $\text{см}^2/\text{г}$	В/Ц	Прочность при сжатии в $\text{кгс}/\text{см}^2$ в возрасте бетона		Прочность при изгибе в $\text{кгс}/\text{см}^2$ в возрасте бетона	
			7 суток	28 суток	7 суток	28 суток
			A	32	0,575	242
B	32	0,575	247	329	38	46
C	32	0,575	251	334	40	46
D	32	0,575	237	327	35	42

тырех зерновых составов, приведенных в табл. 3.13, воспроизведенных из статьи Дэви, являются составами с пропуском ряда фракций.

Выявлено, что повышение удельной поверхности заполнителя при постоянном водоцементном отношении приводит к снижению прочности бетона, что очевидно из данных табл. 3.14, воспроизводящих результа-

Таблица 3.14. Зависимость прочности бетона от удельной поверхности заполнителя для смеси состава 1 : 6 с  $B/C=0,6$

Удельная поверхность заполнителя в $см^2/г$	Прочность бетона при сжатии в 28-суточном возрасте в $кгс/см^2$	Объемный вес свежесушеной бетонной смеси в $кг/м^3$
22,4	368	2320
28	356	2310
43,7	308	2300
57,1	281	2250

ты исследований Ньюмана и Тейшеннэ. Причины этого полностью не ясны, но возможно, что снижение плотности бетона вследствие уменьшения крупности заполнителя приводит к снижению прочности бетона.

По-видимому, площадь поверхности заполнителя является важным фактором, определяющим удобоукладываемость бетонной смеси, хотя до сих пор точно не установлена действительная роль мелких частиц заполнителя.

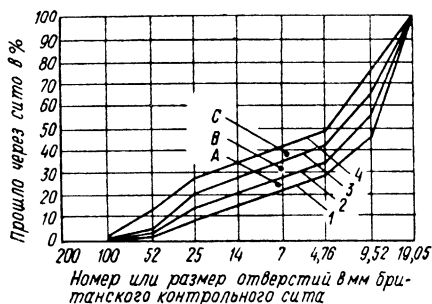


Рис. 3.13. Типовые предельные кривые зерновых составов заполнителя с наибольшей крупностью 19,05 мм

A, B, C — области зерновых составов

Типовые зерновые системы, приведенные в «Дорожных записках» № 4, характеризуются различными значениями общей удельной поверхности. Например, при использовании речного песка и гравия четыре кривых зернового состава № 1—4 (см. рис. 3.13) характеризуются соответственно удельной поверхностью 16, 20, 25 и 33  $см^2/г$ . Свойства бетонных смесей, приготовленных на заполнителях, зерновой

состав которых незначительно отличается от типового состава, будут практически одинаковыми в тех случаях, когда небольшой недостаток мелких зерен компенсируется несколько большим избытком крупных зерен. Однако это отклонение не должно быть слишком большим.

Несомненно, зерновой состав заполнителя является важным фактором, влияющим на удобоукладываемость бетонной смеси. Удобоукладываемость в свою очередь определяет: водопотребность и расход цемента, расслоение смеси, возможность выделения цементного молока на поверхности бетона, качество укладки и отделки поверхности бетона. Перечисленные свойства оказывают существенное влияние на свойства затвердевшего бетона: прочность, усадку и долговечность.

Таким образом, состав бетона в большой мере определяется зерновым составом заполнителя, однако выразить математически эту зависимость пока не представляется возможным.



И, наконец, следует помнить, что значительно более важным, чем подбор идеального зернового состава, является обеспечение постоянства рационального зернового состава, в противном случае бетонная смесь будет характеризоваться переменной удобоукладываемостью. Поскольку удобоукладываемость обычно корректируется в бетономешалке посредством изменения содержания воды, то это приводит к получению бетона переменной прочности.

### **РАЦИОНАЛЬНЫЕ ЗЕРНОВЫЕ СОСТАВЫ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ**

Из краткого обзора, приведенного в предыдущем разделе, можно видеть, насколько важным является использование заполнителя с таким зерновым составом, который бы обеспечивал удовлетворительную удобоукладываемость и достаточную связность бетонной смеси. Последнее требование весьма важно, так как удобоукладываемая бетонная смесь,

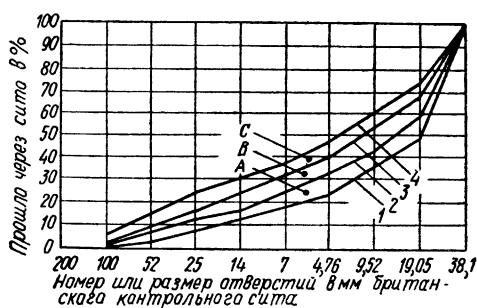


Рис. 3.14. Типовые предельные кривые зерновых составов заполнителя с наибольшей крупностью 38,1 мм

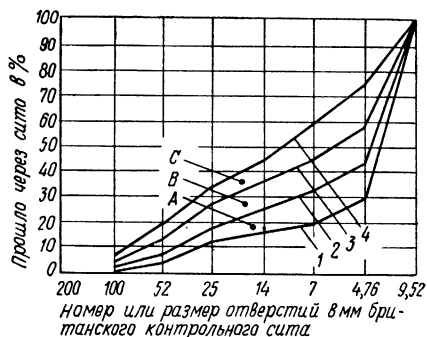


Рис. 3.15. Типовые предельные кривые зерновых составов заполнителя с наибольшей крупностью 9,52 мм

позволяющая получить прочный и экономичный бетон, в случае ее расслоения приведет к образованию раковистого непрочного недолговечного и неоднородного материала.

Методы расчета количества различных фракций заполнителя с целью получения требуемого зернового состава рассматриваются в главе 10, посвященной подбору состава бетона. В данном разделе будут рассмотрены характеристики некоторых «оптимальных» кривых рациональных зерновых составов заполнителя. Однако следует помнить, что на практике необходимо использовать местный заполнитель или заполнитель, доставляемый из близлежащих районов. При подборе зернового состава заполнителя наиболее часто пользуются предельными кривыми зерновых составов, приведенными в «Дорожных записках» № 4.

Предельные кривые зерновых составов заполнителей с наибольшей крупностью 19,05 и 38,1 мм даны соответственно на рис. 3.13 и 3.14. Ана-

логичные кривые для заполнителя с наибольшей крупностью 9,53 мм предложены Макинтошем и Эртнроем из цементной и бетонной ассоциации. Они приведены на рис. 3.15. На графиках показаны четыре кривые зерновых составов, каждая для наибольшей крупности заполнителя. Из-за отсутствия в заполнителе зерен повышенной и пониженной крупности, а также вследствие непостоянства крупности зерен в пределах отдельных фракций можно считать, что кривые рациональных зерновых составов расположены вблизи указанных предельных кривых. Следовательно, удобнее говорить об областях зерновых составов. Эти области отмечены на всех приводимых графиках. В ряде технических

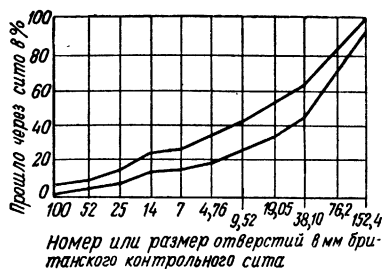


Рис. 3.16. График предельных кривых рациональных зерновых составов заполнителя с наибольшей крупностью 152,4 мм

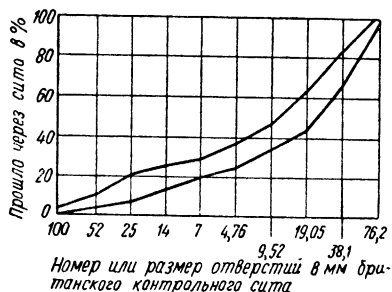


Рис. 3.17. График предельных кривых рациональных зерновых составов заполнителя с наибольшей крупностью 76,2 мм

условий предельные кривые рациональных зерновых составов заполнителя приводятся чаще, чем просто одна кривая рационального зернового состава.

На каждом из рисунков кривая 1 представляет наиболее крупный зерновой состав. Бетонные смеси на заполнителе с таким зерновым составом характеризуются сравнительно хорошей удобоукладываемостью, поэтому этот заполнитель может быть использован для смесей с низким водоцементным отношением или для жирных смесей, однако при этом необходимо быть уверенным, что не будет сегрегации заполнителя. Кривая 4 представляет собой наиболее мелкий зерновой состав. Он будет характеризоваться хорошей связностью, но бетонная смесь на нем будет обладать пониженной удобоукладываемостью. В частности, избыток зерен фракции, ограниченной размером 4,76 мм и размером отверстий британского контрольного сита № 14, приведет к получению жесткой бетонной смеси, укладку которой можно провести только при помощи вибрации. Водопоглощение бетонных смесей одинаковой удобоукладываемости на заполнителях с зерновыми составами, соответствующими кривым 1 и 4, была бы значительно выше для последнего. При одинаковом значении отношения заполнитель: цемент это бы означало, что бетон на заполнителе с зерновым составом 4 характеризовался бы пониженной прочностью. Для сохранения одинаковой прочности указанных

двух бетонов бетон, приготовленный на более мелком заполнителе, должен быть значительно жирнее, т. е. каждый кубический метр должен содержать больше цемента, чем бетон на заполнителях с более крупным зерновым составом.

Если зерновой состав заполнителя расположен частично в одной области и частично в другой, то имеется опасность расслоения бетонной смеси, особенно при отсутствии в заполнителе ряда промежуточных фракций. С другой стороны, при избытке в заполнителе зерен средней крупности бетонная смесь становится жесткой и с трудом поддается укладке не только вручную, но даже при помощи вибратора. Поэтому предпочтительней для бетона использовать заполнители, зерновые составы которых близки к типовым составам.

На рис. 3.16 и 3.17 показаны области зерновых составов заполнителя с наибольшей крупностью соответственно 152,4 и 76,2 мм. Кривые фактических зерновых составов должны проходить параллельно предельным кривым, а не пересекать область от одной предельной кривой к другой.

На практике использование отдельно мелкого и крупного заполнителя означает, что зерновой состав может быть доведен до полного соответствия типовому зерновому составу в одной промежуточной точке, обычно соответствующей размеру зерен 4,76 мм. Близкое совпадение может быть также получено в конечных точках кривой, соответствующих размеру отверстий британского стандартного сита № 100 и наибольшей крупности заполнителя. Если крупный заполнитель поставляют в виде отдельных фракций, как это обычно бывает, совпадение может быть получено в дополнительных точках, расположенных на графике правее размера зерен 4,76 мм, однако для фракций заполнителя меньше, чем 4,76 мм, необходимо перемешивание двух и более фракций песка.

### ***ЗЕРНОВОЙ СОСТАВ МЕЛКОГО И КРУПНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ***

---

Поскольку дозировку мелкого и крупного заполнителей проводят отдельно, то необходимо знать и тщательно контролировать зерновой состав каждого вида заполнителя в отдельности.

Раньше была признана классификация, по которой мелкий заполнитель разделили на два класса, однако выявлено, что, подбирая рациональное соотношение между мелким и крупным заполнителем, можно получить бетон удовлетворительного качества на заполнителе как одного, так и другого класса. Поэтому в 1954 г. при пересмотре BS 882 классификация мелкого заполнителя была изменена, при этом стандартом были введены четыре области зернового состава. Требования к зерновым составам заполнителя, относящимся к этим областям, приведены в табл. 3.20 и на рис. 3.18. Любой мелкий заполнитель считают пригодным для бетонов, если его зерновой состав находится полностью в пределах одной из указанных четырех областей. Допускается отклонение в 5% общего количества заполнителя, проходящего через все британские контрольные сита, за исключением сита № 25. Однако заполнитель

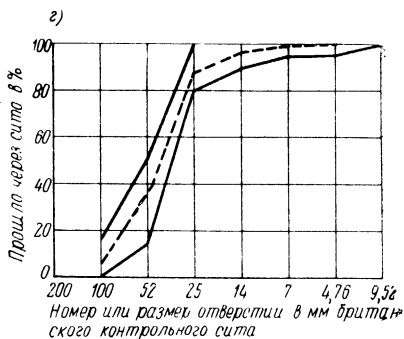
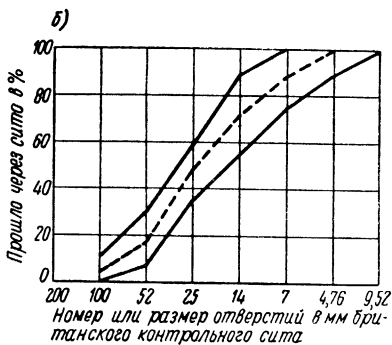
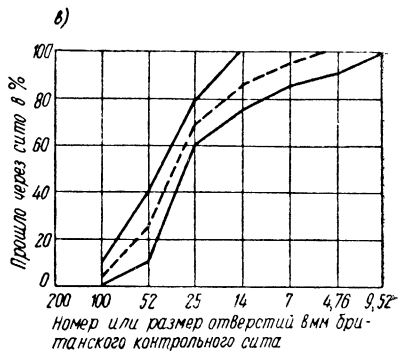
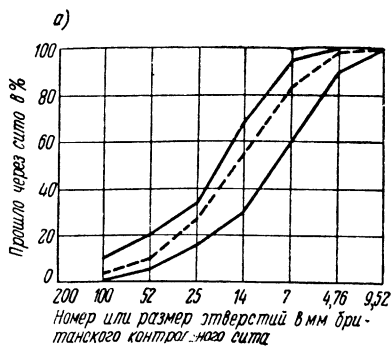


Рис. 3.18. График предельных кривых зерновых составов песка, соответствующих областям 1—4 по BS 882 : 1954

Область: а—1; б—2; в—3; г—4 (пунктирная линия — кривая зернового состава по табл. 3.25)

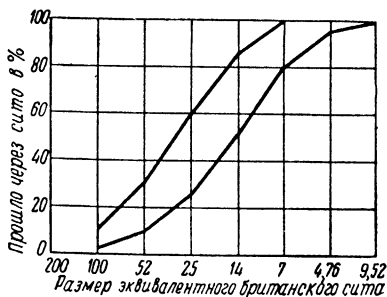


Рис. 3.19. График предельных кривых зерновых составов песка в соответствии с требованиями стандарта ASTM C 33—61

не должен выходить за пределы самого мелкого зернового состава (предельная кривая 4) или самого крупного зернового состава (предельная кривая 1). Единственное исключение может быть в случае использования дробленого песка, когда допускается проход 20% материала сквозь британское контрольное сито № 100 во всех четырех областях. Для сравнения в табл. 3.15 (рис. 3.19) частично включены требования Технических условий ASTM C 33—57. Допускаемый диапазон значений в этих Технических условиях намного уже, чем в BS 882 : 1954.

**Таблица 3.15. Требования Британского стандарта и ASTM к зерновому составу мелкого заполнителя**

Размер отверстий в мм или № британского контрольного сита	Количество заполнителя, проходящего сквозь британские контрольные сита, в %				
	BS 882:1954				стандарт ASTM C 33—57
	область				
	1	2	3	4	
9,53	100	100	100	100	100
4,77	90—100	90—100	90—100	95—100	95—100
№ 7	60—95	75—100	85—100	95—100	80—100
№ 14	30—70	55—90	75—100	90—100	50—85
№ 25	15—34	35—59	60—79	80—100	25—60
№ 52	5—20	8—30	12—40	15—50	10—30
№ 100	0—10*	0—10*	0—10*	0—15*	2—10

\* Для дробленых песков допустимая граница увеличивается до 20%.

Требования Бюро мелиорации США приведены в табл. 3.16. Можно отметить, что для бетона с вовлеченным воздухом допускается пониженное количество самых мелких зерен, так как вовлеченный воздух оказывает влияние, аналогичное воздействию очень мелкого заполнителя.

**Таблица 3.16. Требования Бюро мелиорации США к зерновому составу мелкого заполнителя**

Размер отверстий в мм или № эквивалентного британского контрольного сита	Частный остаток на сите в %
4,77	0—5
№ 7	5—15 или 5—20
№ 14	10—25 или 10—20
№ 25	10—30
№ 52	15—35
№ 100	12—20
Меньше № 100	3—7

В BS 882:1954 деление зерновых составов на области основано главным образом на различном процентном содержании зерен, проходящих сквозь британское контрольное сито № 25, что подтверждается данными, приведенными в табл. 3.15. Основная причина этого заключается в том, что большое количество песков разделено природным способом как раз по этому размеру. Количество зерен более крупных и более мелких, чем этот размер, является примерно постоянным во всех четырех областях. Кроме того, содержание зерен более мелких, чем размер отверстий сита № 25, оказывает значительное влияние на удо-

боукладываемость бетонной смеси и на величину общей удельной поверхности песка.

Песок, зерновой состав которого находится в любой из четырех областей, обычно может быть использован в бетоне, хотя в определенных условиях пригодность данного песка может зависеть от зернового состава и формы зерен крупного заполнителя.

Пригодность мелкого заполнителя, относящегося к области 4, для использования в железобетоне должна быть дополнительно проверена экспериментальным путем. Так как большая часть этого песка мельче, чем размер отверстий британского контрольного сита № 25, то зерновой состав этого песка характеризуется пропуском некоторых фракций. Поэтому подбору состава бетона на таком песке следует уделить особое внимание. Содержание песка в бетонной смеси должно быть низким. Рекомендуемые значения отношения крупный заполнитель: мелкий заполнитель приведены в табл. 3.17. Тем не менее бетон достаточно хорошего качества может быть получен и на песке, относящемся к области 4, особенно при использовании виброуплотнения.

**Таблица 3.17. Рациональное соотношение в бетоне по весу между крупным и мелким заполнителем при использовании песков, относящихся к различным областям на графике кривых зернового состава**

Наибольшая крупность крупного заполнителя в мм	Отношение крупный заполнитель: мелкий заполнитель для областей песков			
	1	2	3	4*
9,53	1	1,5	2	3
19,05	1,5	2	3	3,5
38,1	2	3	3,5	—

\* Пригодность бетонной смеси для использования в железобетоне должна быть подтверждена экспериментально.

Применение крупного песка, относящегося к области 1, способствует образованию жесткой бетонной смеси. Следовательно, высокое содержание песка может явиться необходимым условием для повышения удобоукладываемости бетонной смеси. Крупный песок более пригоден для использования в жирных смесях или в бетоне низкой удобоукладываемости.

Область 2 представляет песок средней крупности, обычно пригодный для «стандартной» смеси мелкого и крупного заполнителя состава 1:2 (при наибольшей крупности заполнителя 19,05 мм).

В целом отношение количества крупного заполнителя к мелкому должно быть тем больше, чем мельче зерновой состав мелкого заполнителя. Оптимальные значения этого отношения приведены в табл. 3.22. При использовании в качестве крупного заполнителя дробленого щебня требуется несколько большее количество песка, чем при использовании

гравия, что позволит компенсировать снижение удобоукладываемости из-за остроугольности дробленых зерен.

Выбор правильного соотношения между крупным и мелким заполнителем особенно важен в тех случаях, когда зерновой состав песка приближается к внешней предельной кривой области 4 (мелкий песок) или к внешней предельной кривой области 1 (крупный песок). Однако следует отметить, что мелкий песок с правильно подобранным зерновым составом может с успехом использоваться в бетонах. В прошлом было много сомнений относительно пригодности этого типа заполнителя.

Пример использования песка из любой из четырех областей с целью получения бетона одинакового качества приведен в табл. 3.18, в которой даны результаты исследований, проведенных в Строительном исследовательском центре. Кривые фактических зерновых составов песка приведены на рис. 3.18. При этом были использованы отношение заполнитель : цемент, равное 6,04, и  $V/C=0,6$  (оба по весу). Для поддержания примерно одинаковой удобоукладываемости отношение крупный заполнитель : мелкий заполнитель варьировали таким образом, чтобы общая удельная поверхность заполнителя оставалась постоянной, равной  $25,5 \text{ см}^2/\text{г}$ . Данные табл. 3.18 подтверждают, что во всех случаях был получен бетон примерно одинакового качества.

Таблица 3.18. Свойства бетона, изготовленного на заполнителях с постоянной общей удельной поверхностью

Характеристика бетона	Область зернового состава песка			
	1	2	3	4
Общая удельная поверхность в $\text{см}^2/\text{г}$ . . . . .	25,5	25,5	25,5	25,5
Количество материала, проходящего сквозь сито 4,8 мм, в % . . . . .	46	36	29	24
Приближенный состав бетона по объему . . . . .	1:2,5:3,5	1:2:4	1:1,5:4,5	1:1,5:4,75
$V/C$ по весу . . . . .	0,6	0,6	0,6	0,6
Коэффициент уплотнения . . . . .	0,92	0,93	0,93	0,94
Прочность при сжатии через 28 суток в $\text{кгс}/\text{см}^2$ . . . . .	276	287	297	295

Для сравнения в табл. 3.19 приведены результаты испытаний бетона для случая, когда для приготовления ряда бетонов использовали одни и те же материалы, но отношение крупный заполнитель : мелкий заполнитель сохраняли постоянным. В результате, чем мельче был применяемый песок, тем выше оказывалась водопотребность и соответственно ниже прочность бетона.

Требования BS 882:1954 к зерновому составу крупного заполнителя приведены в табл. 3.20, при этом соответствующие значения указаны как для фракционированного заполнителя, так и для номинальных

Таблица 3.19. Свойства бетонов одинакового состава, приготовленных на заполнителях с различным зерновым составом

Характеристика бетона	Область зернового состава песка <sup>1</sup>			
	1	2	3	4
Общая удельная поверхность в $см^2/г$ . . . . .	20,8	25,5	30,4	35,5
Количество материала, проходящего сквозь сито 4,77 мм, в % . . . . .	36	36	36	36
Приближенный состав бетона по объему . . . . .	1:2:4	1:2:4	1:2:4	1:2:4
В/Ц по весу . . . . .	0,58	0,5	0,63	0,66
Коэффициент уплотнения . . . . .	0,92	0,95	0,95	0,96
Прочность при сжатии через 28 суток в $кг/см^2$ . . . . .	322	295	253	237

<sup>1</sup> Фактические зерновые составы приведены на рис. 3.18.

Таблица 3.20. Требования BS 882 : 1954 к зерновому составу крупного заполнителя

Размер отверстий в мм или № британских контрольных сит	Проход через британские контрольные сита в %							
	при номинальном размере фракционированного заполнителя в мм			при номинальном размере однофракционного заполнителя в мм				
	4,77—38,1	4,77—19,05	4,77—12,7	63,5	38,1	19,05	12,7	9,53
76,2	100	—	—	100	—	—	—	—
63,5	—	—	—	85	100	—	—	—
38,1	95—100	100	—	0—30	85—100	100	—	—
19,05	30—70	95—100	100	0—5	0—20	85—100	100	—
12,7	—	—	90—100	—	—	—	85—100	100
9,53	10—35	25—55	40—85	—	0—5	0—20	0—45	85—100
4,77	0—5	0—10	—	—	—	0—5	0—10	0—20
№ 7	—	—	—	—	—	—	—	0—5

одноразмерных фракций. Для сравнения аналогичные требования Технических условий ASTM C 33—61 приведены в табл. 3.21.

Фактический зерновой состав до некоторой степени определяется также формой и текстурой поверхности зерен заполнителя. Например, заполнитель, состоящий из остроугольных зерен с шероховатой поверхностью, должен иметь зерновой состав пониженной крупности, чтобы уменьшить возможность сцепления зерен и компенсировать высокое трение между ними. Фактический зерновой состав дробленого заполнителя зависит главным образом от типа используемого дробильного оборудования. Валковая дробилка обычно производит меньше мелких



зерен, чем другие типы дробильного оборудования. Фактический зерновой состав зависит также от количества материала, одновременно вводимого в камнедробилку.

Таблица 3.21. Требования стандарта ASTM С 33—61 к зерновому составу крупного заполнителя

Размер отверстий в мм или номер эквивалентного британского контрольного сита	Проход через британские контрольные сита в %				
	при номинальном размере фракционированного заполнителя в мм			при номинальном размере однофракционного заполнителя в мм	
	4,77—38,1	4,77—19,05	4,77—12,7	63,5	38,1
76,2	—	—	—	100	—
69,5	—	—	—	90—100	—
50,8	100	—	—	35—70	100
38,1	95—100	—	—	0—15	90—100
25,4	—	100	—	—	20—55
19,05	35—70	90—100	100	0—5	0—15
12,7	—	—	90—100	—	—
9,53	10—30	20—55	40—70	—	0—5
4,77	0,5	0—10	0—15	—	—
№ 7	—	0—5	0—5	—	—

Предельные кривые зернового состава неразделенного (крупного и мелкого) заполнителя приведены в табл. 3.22. Следует помнить, что в настоящее время этот тип заполнителя используется только для бетонов, применяемых для небольших и неответственных бетонных сооружений, поскольку при хранении в штабелях трудно избежать расслоения этого заполнителя.

Таблица 3.22. Требования BS 882 : 1954 к зерновому составу объединенного (крупного и мелкого) заполнителя

Размер отверстий в мм или № британских контрольных сит	Проход через британские контрольные сита в % при номинальном размере заполнителя в мм	
	38,1	19,05
76,2	100	—
38,1	95—100	100
19,05	45—75	95—100
4,77	25—45	30—50
№ 25	8—30	10—35
№ 100	0—6	0—6

**ОСОБО КРУПНЫЕ И ОСОБО МЕЛКИЕ  
ЗЕРНА ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

Строго придерживаться установленного диапазона размеров зерен заполнителя невозможно, поскольку естественное истирание во время транспортирования заполнителя будет способствовать образованию некоторого количества материала размером меньше номинального, а износ сит в сортировочной или дробильной установке приведет к присутствию в заполнителе слишком крупных зерен. В США размеры сит, крупнее и мельче номинальных, установлены Техническими условиями соответственно как  $\frac{7}{6}$  и  $\frac{5}{6}$  от номинального размера сита. Фактические размеры этих сит указаны в табл. 3.23. Содержание зерен заполнителя более мелких, чем размер отверстий указанных сит пониженной крупности, или более крупных, чем размер отверстий сит повышенной крупности, обычно строго ограничивается.

*Таблица 3.23. Сита больше и меньше номинального размера, рекомендуемые для применения Бюро мелiorации США*

Номинальный размер фракций в мм	Размер отверстий сит в мм для заполнителя размером	
	меньше номинального	больше номинального
4,77—9,53	№ 5*	12,7
9,53—19,05	7,95	22,23
19,05—38,1	15,88	44,45
38,1—76,2	31,75	88,9
76,2—152,4	63,5	203,2

\* Номер сита по ASTM.

Требования BS 882:1954 к зерновому составу крупного и мелкого заполнителей допускают наличие в них некоторого количества зерен размером меньше и больше номинального. Значения для крупного заполнителя приведены в табл. 3.20, из данных которой можно видеть, что допускаемое количество зерен размером больше номинального составляет 5—15%. Однако заполнитель не должен оставаться на сите, следующем в стандартном наборе за контрольным ситом, размер отверстий которого соответствует номинальной наибольшей крупности заполнителя. Допускаемое количество материала размером меньше номинального составляет 5—10%. В случае использования однофракционного заполнителя присутствие некоторого количества зерен размером меньше номинального также допускается. Важно, чтобы эта мелкая фракция крупного заполнителя не была забыта при вычислении фактического зернового состава.

Для мелкого заполнителя допускается общее отклонение 5% предельных кривых зернового состава.

## **«ПРЕРЫВИСТЫЙ» ЗЕРНОВОЙ СОСТАВ ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

«Прерывистый» зерновой состав можно определить как зерновой состав, в котором одна или более одной промежуточных фракций пропущены. Термин «непрерывный» зерновой состав используют для того, чтобы отличить традиционный зерновой состав со всеми требуемыми фракциями от прерывистого зернового состава с пропуском некоторых фракций. На кривой зернового состава прерывистый состав представлен горизонтальной линией под рядом пропущенных размеров фракций. Например, верхняя кривая зернового состава на рис. 3.20 показывает, что в заполнителе отсутствуют зерна размером от 9,52 мм до размера отверстий британского контрольного сита № 7. В некоторых случаях пропуск фракций в диапазоне от 9,52 мм до размера отверстий сита № 14 считают приемлемым.

Отсутствие этих фракций уменьшило бы количество требуемых штабелей заполнителя и таким образом привело бы к экономии. При использовании заполнителя с наибольшей крупностью 19,05 мм понадобилось бы только два штабеля: крупного заполнителя фракции 9,52—19,05 мм и песка, просеянного через сито № 14. Зерна мельче, чем размер отверстий британского контрольного сита № 14, могли бы легко проникнуть в пустоты крупного заполнителя, таким образом удобоукладываемость бетонной смеси была бы выше, чем удобоукладываемость смеси на заполнителе с непрерывным зерновым составом при одинаковом расходе песка.

Результаты испытаний, проведенных Шэкломом, показали, что при заданных величинах отношений заполнитель:цемент и  $V/C$  наивысшая удобоукладываемость смеси была получена при пониженном расходе песка на заполнителе с прерывистым зерновым составом. Однако в диапазоне более удобоукладываемых смесей заполнитель с прерывистым зерновым составом показывал большую склонность к расслоению. Поэтому применение заполнителя с прерывистым зерновым составом рекомендуется главным образом для бетонных смесей относительно низкой удобоукладываемости, которые предполагают уплотнять при помощи вибраторов. Весьма важным является надежный контроль за сохранением связности бетонной смеси, особенно при ее транспортировании.

Следует отметить, что даже при использовании обычных заполнителей мы иногда встречаемся с пропуском фракций в зерновом составе. Например, песок, относящийся к области 4 (BS 882:1954), почти пол-

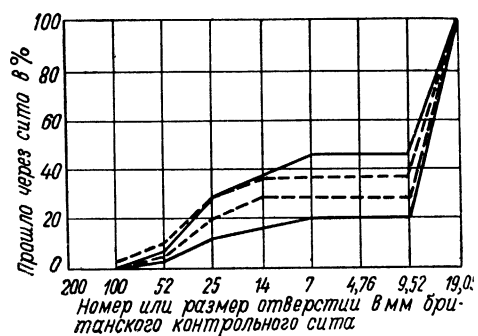


Рис. 3.20. Типовые предельные кривые с прерывистой гранулометрией заполнителя

ностью лишен зерен размером между 4,76 мм и размером отверстий британского контрольного сита № 7 или 14. Таким образом, всякий раз, когда мы используем песок области 4 без смешивания с более крупным песком, мы фактически используем заполнитель с прерывистым зерновым составом.

Время от времени делались различные заявления о превосходных свойствах бетонов, приготовленных на заполнителе с прерывистым зерновым составом, однако, по-видимому, эти заявления не имеют достаточно веских оснований; прочность как при сжатии, так и при растяжении остается без изменения.

Результаты исследований Макинтоша (см. рис. 3.21) также подтверждают, что при использовании одних и тех же материалов с заданным отношением заполнитель : цемент (но варьируя содержание песка)

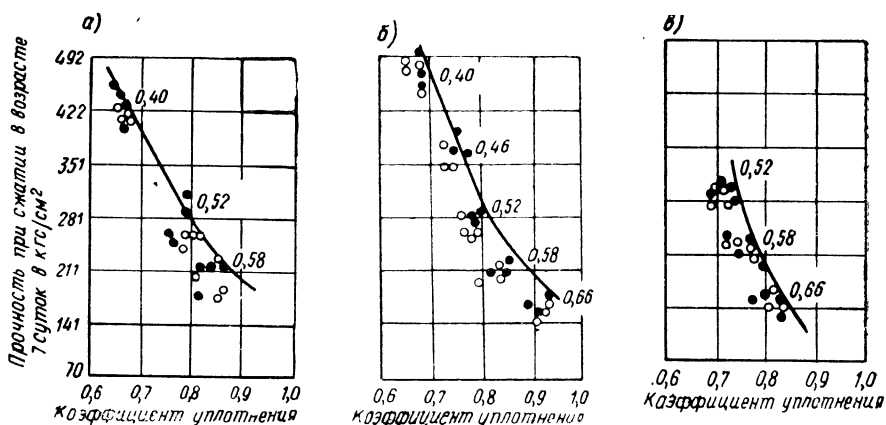


Рис. 3.21. Удобоукладываемость и прочность бетонов состава 1 : 6, приготовленных на заполнителях с непрерывной (светлые кружочки) и прерывистой (темные кружочки) гранулометрией. Каждая группа точек на графиках представляет смеси с указанным  $V/C$ , но с различным содержанием песка

а — гравий и песок; б — гранитный щебень и песок; в — гранитный щебень

получают примерно одинаковую удобоукладываемость и прочность бетона на заполнителе с непрерывным и прерывистым зерновыми составами.

Не наблюдаются различия и в величине усадки бетонов, приготовленных на заполнителе с обоими типами зернового состава, хотя можно было бы ожидать, что наличие каркаса из крупных зерен, почти касающихся друг друга, приведет при высыхании к меньшей усадке бетона. Сопротивление бетона попеременному замораживанию и оттаиванию меньше при использовании заполнителя с пропуском ряда фракций.

Следовательно, можно считать, что заявления защитников прерывистых зерновых составов не подтверждаются результатами исследований. Для приготовления хорошего бетона может быть использован за-

полнитель как с прерывистым, так и непрерывным зерновым составом, однако в каждом отдельном случае необходимо выбрать правильное процентное содержание песка. Таким образом, можно еще раз подчеркнуть, что нам следует стремиться не к идеальному зерновому составу, а найти наилучшую комбинацию имеющихся в нашем распоряжении заполнителей.

### **НАИБОЛЬШАЯ КРУПНОСТЬ ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

Ранее уже упоминалось, что чем крупнее зерна заполнителя, тем меньше суммарная площадь его поверхности, требующая увлажнения. Таким образом, применение крупного заполнителя снижает водопотребность бетонной смеси, поэтому для установленной удобоукладываемости и жирности смеси водоцементное отношение может быть снижено, что приводит к повышению прочности бетона.

Это положение подтверждается результатами испытания смесей на заполнителях с наибольшей крупностью вплоть до 38,1 мм и может быть распространено на заполнители с большей крупностью. Результаты экспериментальных исследований показывают, однако, что при наибольшей крупности заполнителя свыше 38,1 мм повышение прочности в результате снижения водопотребности сводится на нет вследствие уменьшения площади сцепления заполнителя и нарушения сплошности бетона, вызываемого наиболее крупными зернами, особенно в жирных смесях.

Такое отрицательное влияние на свойства бетонной смеси, связанное с увеличением размера крупнейших зерен заполнителя в бетонной смеси, на практике наблюдается во всем диапазоне размеров, однако при крупности менее 38,1 мм влияние размера зерен, вызывающее снижение водопотребности, является доминирующим. На рис. 3.22, воспроизведенном из статьи Блоэма, приведены кривые, по которым можно сравнить фактическую 2 прочность с расчетной 1, вычисленной на основе значений водоцементного отношения. Следовательно, использование заполнителя с наибольшей крупностью более 25,4—38,1 мм не дает повышения прочности. Применение более крупного заполнителя потребовало бы устройства отдельного штабеля и повысило возможность расслоения смеси. Однако практическое решение зависит также от наличия и стоимости различных фракций. Имеются, конечно, и конструкционные ограничения: наибольшая крупность заполнителя не должна

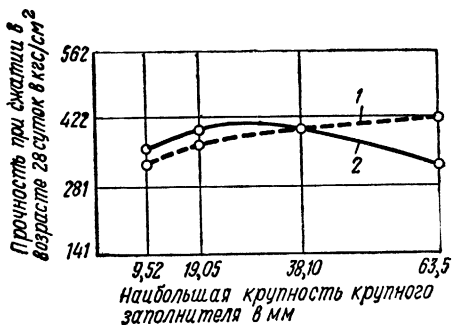


Рис. 3.22. Влияние наибольшей крупности заполнителя на прочность бетона при сжатии

превышать  $\frac{1}{5} — \frac{1}{4}$  толщины бетонного элемента; ее выбор зависит также от запроектированного расположения арматуры. Рекомендуемые значения приводятся в применяемых нормах СР 114 (1957).

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРУПНЫХ КАМНЕЙ**

Первоначальная идея об использовании заполнителя в бетоне в качестве инертного материала может быть распространена на включение крупных камней в обычный бетон. Таким образом, фактический выход бетона по объему при заданном расходе цемента возрастает.

Камни используют в массивных бетонных конструкциях, размер их может достигать в поперечнике до 30 см. Объем камней не должен превышать 30% общего объема бетона, при этом камни должны быть равномерно распределены во всей массе бетона. На практике это достигается путем укладки слоя обычного бетона с последующим распределением по нему камней, после чего укладывают следующий слой бетона и т. д. Каждый слой обычного бетона должен быть не меньше чем двойная толщина камней.

Укладка камней является очень трудоемкой операцией, к тому же нарушающей непрерывность процесса бетонирования. Следовательно, не удивительно, что при существующем в настоящее время высоком соотношении между трудовыми затратами и стоимостью цемента использование камней является малоэкономичным, за исключением специальных случаев.

Прочность бетона при данном составе бетонной смеси зависит от степени ее уплотнения. Необходима такая консистенция смеси, чтобы ее можно было перевозить, укладывать и обрабатывать достаточно легко и без расслаивания.

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТИ<sup>1</sup> БЕТОНА**

---

Бетон, удовлетворяющий приведенным выше требованиям, называют удобоукладываемым, но сказать, что удобоукладываемость означает только легкость укладки и отсутствие расслаивания, значит неточно определить это важнейшее свойство бетона. В конкретном случае удобоукладываемость будет зависеть от имеющихся средств уплотнения бетона; так, удобоукладываемость, необходимая для бетонных массивов, вряд ли подойдет для тонкостенных и густоармированных конструкций. Поэтому удобоукладываемость следует определять только как физическое свойство бетонной смеси независимо от типа конструкций, в которую смесь укладывается. Для такого определения необходимо рассмотреть, что происходит с бетоном при его уплотнении. Независимо от того, осуществляется ли процесс уплотнения трамбованием или вибрацией, он заключается в основном в удалении из бетона воздуха, пока не будет достигнута максимально возможная плотность для данной смеси и конфигурации. Таким образом, производимая работа направлена на преодоление сцепления между отдельными частицами в бетоне, а также сцепления между бетоном и поверхностью опалубки или арматуры. Эти два явления можно назвать соответственно внутренним и поверхностным сцеплением. Часть производимой работы затрачивается на колебания опалубки или на сотрясение, а также на вибра-

---

<sup>1</sup> В английской литературе для обозначения этого свойства применяют термин «workability», т. е. «удобообрабатываемость». В нашей практике и технической литературе распространен термин «удобоукладываемость», поэтому в дальнейшем мы пользуемся этим термином, который характеризует способность бетонной смеси при данной затрате энергии равномерно заполнять форму и укладываться в ней. Наиболее точным параметром, характеризующим это свойство, является «техническая вязкость». Большие исследования свойств бетонной смеси и способов ее уплотнения проведены под руководством А. Е. Десова [38]. (Прим. ред.)

цию уже схватившихся частиц бетона. Таким образом, производимая работа состоит из «бесполезной» и «полезной», причем последняя, как уже упоминалось, представляет собой работу, затрачиваемую на преодоление внутреннего и поверхностного сцепления. Поскольку самой смеси свойственно только внутреннее сцепление, удобоукладываемость наиболее точно можно определить как количество полезной внутренней работы, необходимой для достижения полного уплотнения. Это определение было разработано Глэвиллем, Коллинзом и Мэтьюзом, которые в лаборатории дорожных исследований всесторонне исследовали проблему уплотнения и удобоукладываемости.

Другое понятие, применяемое для определения состояния бетонной смеси, — это консистенция.

В обычном английском языке это слово обозначает сохранность формы вещества или его способность к пластической деформации. В применении к бетонной смеси термин «консистенция» иногда употребляется для обозначения степени ее влажности; в определенных пределах влажные бетонные смеси более удобоукла-

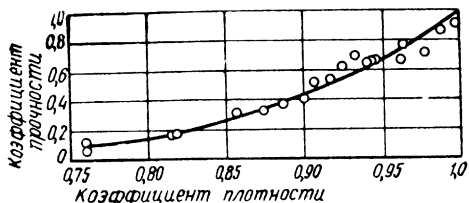


Рис. 4.1. Соотношение между коэффициентом прочности и коэффициентом плотности

дываемы, чем сухие, но и при одной и той же консистенции они могут отличаться по удобообрабатываемости.

До сих пор удобоукладываемость рассматривалась только как свойство бетонной смеси. Однако это весьма важное свойство и конечного продукта, поскольку бетон должен иметь такую удобоукладываемость, которая позволила бы достичь при его уплотнении максимальной плотности за счет наименьшего усилия, какое мы готовы затратить при данных условиях.

Необходимость уплотнения становится очевидной при изучении связи между степенью уплотнения и получаемой прочностью. Удобно выражать степень уплотнения как отношение плотности данного бетона к плотности той же смеси при ее полном уплотнении. Точно так же отношение прочности бетона, частично уплотненного, к прочности той же смеси, но полностью уплотненной, можно назвать относительной прочностью. Тогда корреляция между относительной прочностью и относительной плотностью будет иметь вид, показанный на рис. 4.1. Наличие пор в бетоне резко снижает его прочность: 5% пор могут снизить прочность на 30% и даже 2% пор приводят к снижению прочности более чем на 10%. Это соответствует выражению Фере, показывающему отношение прочности к сумме объемов воды и воздуха в твердеющем бетоне.

Поры в бетоне представляют собой либо пузырьки поглощенного воздуха, либо пространства, оставшиеся после удаления воды. Объем последних зависит лишь от водоцементного отношения в смеси. Наличие воздушных пор, которые являются «случайным» воздухом, т. е. пор в первоначально рыхлом зернистом материале, регулируется грануло-



метрическим составом мелкого заполнителя. Они легче вытесняются из более влажного бетона, чем из сухого. Отсюда следует, что для каждого данного метода уплотнения имеется оптимальное содержание воды в смеси, при котором сумма объемов воздушных пор и воды будет минимальной, а плотность бетона — наивысшей. Однако оптимальное содержание воды может быть различным для разных методов уплотнения.

### **ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТЬ**

Главный фактор — это содержание воды в смеси, выраженное в килограммах на кубический метр бетонной смеси. Можно приблизительно принять, что для данного типа и гранулометрического состава заполнителя и удобоукладываемости бетона содержание воды не зависит от отношения заполнитель : цемент. На основании этого можно определять составы бетонных смесей с различным расходом цемента. В табл. 4.1 даны типичные значения содержания воды при различной осадке конуса и максимальной крупности заполнителя.

*Таблица 4.1. Ориентировочное содержание воды при различной осадке конуса и максимальных размерах заполнителя*

Максимальный размер зерен заполнителя в см	Содержание воды в кг на 1 м <sup>3</sup> бетона при осадке конуса					
	2,5—5,1 см		7,6—10,2 см		15,2—17,8 см	
	окатанный заполнитель	угловатый заполнитель	окатанный заполнитель	угловатый заполнитель	окатанный заполнитель	угловатый заполнитель
0,95	190	213,5	201,6	225,3	231,3	255
1,91	172	195,7	189,8	207,5	207,5	225,3
3,81	160,1	172	172	189,8	189,8	207,5
5,08	148,2	166	166	178	178	195,7
7,62	136,4	154,4	154,4	166	160,1	183,8

Эти значения применимы только к бетону без воздухововлекающих добавок. Если в бетоне имеется воздух, то содержание воды может быть снижено в соответствии с данными, представленными на рис. 4.2. Так как влияние вовлеченного воздуха на удобоукладываемость зависит от состава бетонной смеси, приведенные на рис. 4.2 величины являются приближенными.

Если содержание воды и других компонентов смеси фиксировано, то удобоукладываемость регулируется максимальным размером заполнителя, его гранулометрическим составом, формой и текстурой. Однако гранулометрический состав и водоцементное отношение следует рассматривать совместно, так как гранулометрический состав, дающий

наиболее удобоукладываемый бетон при данной величине водоцементного отношения, может не оказаться наилучшим для другой величины этого отношения. В частности, чем больше водоцементное отношение, тем более мелкий гранулометрический состав необходим для получения наибольшей удобоукладываемости. Практически для данной величины водоцементного отношения имеется одно значение отношения крупный : мелкий заполнитель (при применении данных материалов), которое дает наибольшую удобоукладываемость. Для данной удобоукладываемости имеется только одно значение отношения крупный : мелкий заполнитель, которое требует наименьшего содержания воды.

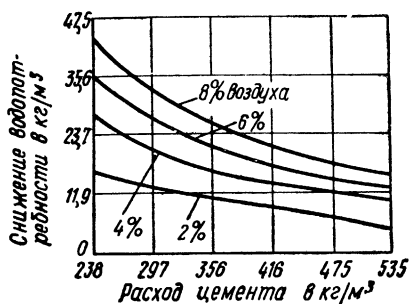


Рис. 4.2. Снижение водопотребности смеси в зависимости от количества вовлеченного воздуха

следует оценивать на основании абсолютного объема каждой фракции. Это приложимо также к бетону, содержащему вовлеченный воздух, так как этот воздух ведет себя как невесомые легкие частицы. Влияние свойств заполнителя на удобоукладываемость уменьшается по мере увеличения жирности смеси и, возможно, полностью исчезает, когда отношение заполнитель : цемент снижается до 2,5 или 2.

На практике следует с осторожностью прогнозировать влияние состава смеси на удобоукладываемость бетона, так как из трех факторов — водоцементное отношение, отношение заполнитель : цемент и содержание воды — только два являются независимыми. Например, если отношение заполнитель : цемент уменьшается, а водоцементное отношение остается постоянным, то содержание воды возрастает, а следовательно, увеличивается и удобоукладываемость. Если же содержание воды остается постоянным при уменьшении отношения заполнитель : цемент, то водоцементное отношение уменьшается, а удобоукладываемость почти не изменяется.

### ИЗМЕРЕНИЕ УДОБУУКЛАДЫВАЕМОСТИ

К сожалению, не существует методов для прямого измерения удобоукладываемости. Однако были предприняты многочисленные попытки установить корреляцию удобоукладываемости с какими-либо легко

осуществляемыми физическими измерениями, но ни одна из них не оказалась полностью удовлетворительной, хотя и могла дать полезную информацию об изменениях удобоукладываемости.

### МЕТОД ОСАДКИ КОНУСА

Этот метод широко применяют на строительных площадках во всем мире. Измерение осадки конуса полезно для обнаружения неоднородности смеси данного номинального состава. Такую методику применя-

Таблица 4.2. Удобоукладываемость, осадка и уплотнение бетонной смеси с максимальным размером заполнителя 1,9 или 3,8 см

Степень удобоукладываемости	Осадка в см	Уплотнение		Область применения бетона
		малыми аппаратами	большими аппаратами	
Очень низкая	0—2,5	0,78	0,8	Дорожные покрытия, уплотненные машинами с механическим приводом. При большей удобоукладываемости бетон может в некоторых случаях уплотняться ручными устройствами
Низкая	2,5—5,1	0,85	0,87	Дорожные покрытия, вибрированные двигателем с ручным приводом. При более удобоукладываемом бетоне возможно уплотнение вручную при применении заполнителя округлой или неправильной формы. Массивные бетонные фундаменты без вибрирования или мало армированные участки с вибрированием
Средняя	5,1—10,2	0,92	0,94	Уплотняемые вручную плоские плиты с применением дробленого заполнителя. Нормальный железобетон, уплотненный вручную, и сильно армированные участки с вибрированием
Высокая	10,2—17,8	0,95	0,96	Для армированных участков. Обычно не годится для вибрирования

ют в разных странах с небольшими отличиями в деталях, не имеющими принципиального значения (рис. 4.3).

Величины осадки конуса для различной удобоукладываемости приведены в табл. 4.2. Следует помнить, что при наличии разных заполнителей одна и та же величина осадки может быть получена при различной удобоукладываемости, так как осадка связана не только с удобоукладываемостью.

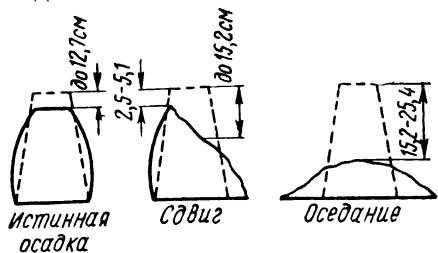


Рис. 4.3. Осадка конуса: истинная, сдвиг, оседание

Определение осадки конуса очень полезно на строительстве как контроль ежедневных и ежечасных изменений материалов, вводимых в бетономешалку. Увеличение осадки может означать, например, что содержание влаги в заполнителе неожиданно возросло. Другой причиной может быть изменение гранулометрического состава заполнителя, а также недостаток песка.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УПЛОТНЕНИЯ

Не существует общепринятого метода непосредственного измерения удобоукладываемости, т. е. количества работы, необходимой для достижения полного уплотнения. Наиболее надежный метод основан на определении степени уплотнения, достигаемой при стандартном количестве работы. Затраченная работа включает работу, проделанную по преодолению поверхностного сцепления, которое сводится к минимуму, хотя фактическое сцепление, вероятно, меняется с изменением удобоукладываемости смеси.

Степень уплотнения, называемая коэффициентом уплотнения, измеряется коэффициентом плотности, т. е. отношением фактически достигнутой во время пробы плотности к плотности того же бетона, но полностью уплотненного.

Метод, известный под названием определения коэффициента уплотнения, был разработан в лаборатории дорожных исследований. Аппарат состоит из двух воронок в форме усеченного конуса и одного цилиндра; все они расположены один над другим. Воронки имеют снизу откидные заслонки, как показано на рис. 4.4. Внутренние поверхности отполированы, чтобы уменьшить трение.

Верхнюю воронку заполняют бетонной смесью, которую закладывают очень осторожно, чтобы на этой стадии она оставалась в неуплотненном состоянии. Затем заслонку верхней воронки открывают и бетонная смесь падает в нижнюю воронку, которая имеет меньшие размеры, чем верхняя, поэтому заполняется с избытком и содержит всегда приблизительно одинаковое количество бетона в стандартном состоянии; влияние факторов, действовавших при заполнении верхней воронки, здесь значительно уменьшается. Нижняя заслонка нижней воронки от-

крывается и бетонная смесь попадает в цилиндр. Избыток смеси срезается двумя скользящими движениями мастерка по верхнему краю цилиндра и измеряется чистый вес бетонной смеси в известном объеме цилиндра.

Затем вычисляется плотность бетонной смеси в цилиндре; полученная величина плотности, деленная на величину плотности полностью уплотненной бетонной смеси, дает коэффициент уплотнения. Плотность при полном уплотнении бетонной смеси может быть определена путем заполнения цилиндра бетонной смесью в четыре слоя, каждый из которых утрамбовывается или вибрируется, или же путем вычисления из абсолютных объемов ингредиентов смеси.

Аппарат для определения уплотнения, показанный на рис. 4.4, имеет высоту около 1,2 м. Для бетонов с максимальной крупностью заполнителя от 1,9 до 3,8 см следовало бы применять «большой» аппарат. Высота его равна 1,82 м, и поэтому большой аппарат на практике не применяется, за исключением заводов сборного железобетона и больших строительных площадок. Для одного и того же бетона большой аппарат дает несколько завышенные значения коэффициента по сравнению с малым аппаратом.

В табл. 4.2 приведены величины коэффициента уплотнения при различной удобоукладываемости, взятые из «Дорожных записок» № 4. В отличие от определения осадки конуса изменения удобоукладываемости отражены в изменениях коэффициента уплотнения, т. е. данная проба более чувствительна при низкой удобоукладываемости, чем при высокой. Однако очень сухие смеси прилипают к стенкам одной или обеих воронок, поэтому их следует осторожно освобождать, подталкивая стальной палочкой. Для бетона с очень низкой удобоукладываемостью фактическое количество работы, необходимой для полного уплотнения, зависит от жирности смеси, а коэффициент уплотнения не зависит: более тощие смеси требуют большей работы, чем более жирные. Это означает, что не всегда оправдано общепринятое мнение, что все смеси с одинаковым коэффициентом уплотнения требуют одинакового количества полезной работы. Точно так же не совсем правильным является упоминавшееся выше предположение, что «бесполезная» работа составляет постоянную часть затраченной общей работы независимо от свойств смеси. Тем не менее коэффициент уплотнения несомненно является удовлетворительной мерой удобоукладываемости.

Недавно разработан автоматический аппарат для определений коэффициента уплотнения. В нем цилиндр поддерживается пружинными весами, которые можно калибровать для данной смеси таким образом, чтобы определять непосредственно удобоукладываемость или даже указывать на недостаток или избыток воды в фунтах на замес.

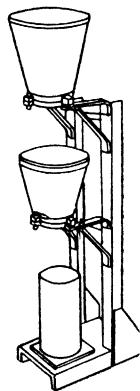


Рис. 4.4. Прибор для определения коэффициента уплотнения

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ

Это определение характеризует консистенцию бетона и его склонность к расслаиванию путем измерения деформации столба бетона при встряхивании. Такое испытание особенно важно для определения расслаивания, но дает также хорошие результаты при определении консистенции жестких, жирных и достаточно связных смесей. Определение пластичности узаконено стандартом ASTM C 124—39. Аппарат состоит из покрытого латунью столика диаметром 76,2 см, укрепленного таким образом, что при толчке он может опуститься на 1,3 см. Форму в виде усеченного конуса, гораздо более плоского и широкого, чем для определения осадки конуса, помещают в центре столика, наполняют бетонной смесью в два слоя и уплотняют. Затем форму удаляют и столик опускают 15 толчками за 15 сек. В результате этих встряхиваний бетонная смесь растекается по столику. Измеряется и вычисляется средний диаметр растекшейся бетонной смеси.

Пластичность бетона определяют как процент увеличения среднего диаметра растекшейся бетонной смеси ( $D$ , см) от первоначального диаметра основания конуса (25,4 см), т. е. пластичность равна  $\frac{D-10}{10} 100$ .

Могут быть получены величины от 0 до 150%.

Встряхивание бетона во время испытания обуславливает его расслоение, и если смесь не связная, то более крупные частицы заполнителя отделяются и перемещаются к краю стола. Возможна и другая форма расслоения: в тестообразной смеси цементное тесто имеет тенденцию к смещению от центра столика, оставляя в середине заполнитель. Следует отметить, что проба на пластичность не является мерой удобоукладываемости, так как бетоны с одинаковой пластичностью могут значительно отличаться по удобоукладываемости.

## ИСПЫТАНИЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ<sup>1</sup>

Описанный выше столик применяют и для другого испытания, при котором удобоукладываемость оценивается на основании определения работы, затрачиваемой на изменение формы образца бетона. Это испытание на изменение формы разработано Пауэрсом.

Схема аппарата показана на рис. 4.5. Стандартный конус для измерения осадки бетонной смеси помещают в цилиндр диаметром 30,5 и высотой 20,3 см, жестко закрепленный на столе, имеющем ход при встряхивании 0,65 см. Внутри главного цилиндра помещено внутреннее кольцо диаметром 20,3 и высотой 12,7 см. Расстояние между нижним краем внутреннего кольца и дном главного цилиндра должно быть регулируемым от 6,7 до 7,6 см.

Конус заполняют бетонной смесью обычным способом, затем его удаляют и на поверхность бетона опускают диск с направляющей

<sup>1</sup> В СССР реологические свойства бетонной смеси, предназначенной для укладки с применением вибрирования, определяют при помощи технического вискозиметра по ГОСТ 10181—62. (Прим. ред.)

штангой общим весом 1,95 кг. Столик встряхивают со скоростью 1 раз в 1 сек, пока нижняя плоскость диска не окажется на высоте 8 см над поверхностью стола. К этому моменту форма бетона изменится из усеченного конуса на цилиндрическую. Усилие, необходимое для получения такого изменения формы, выражается числом встряхиваний. Для очень

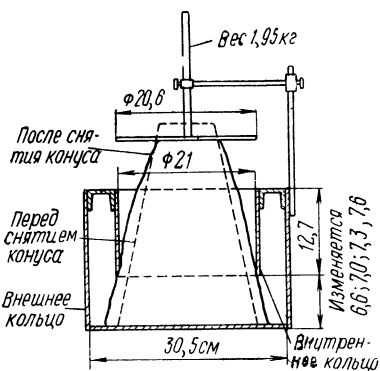


Рис. 4.5. Прибор для проведения испытаний на изменение формы

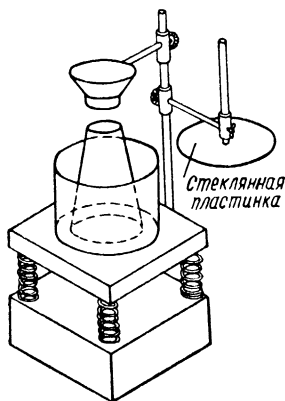


Рис. 4.6. Прибор Вебе

сухих смесей необходимы значительные усилия. Это испытание чисто лабораторное, но может оказаться весьма ценным, так как усилие изменения формы, по-видимому, тесно связано с удобообработываемостью.

### МЕТОД ВЕБЕ

Метод представляет собой дальнейшее развитие испытаний на изменение формы, при котором внутреннее кольцо аппарата Пауэрса вынуто и уплотнение вместо встряхивания достигается вибрированием. Схематически аппарат изображен на рис. 4.6. Название Вебе происходит от инициалов В. Бэрнера, разработавшего в Швеции этот метод.

Предполагается, что изменение формы полное, если пригруз из стеклянной пластины полностью покрыт бетоном и все поры на поверхности бетона исчезли. Момент окончания испытаний определяется визуально, и это может быть источником ошибок. Чтобы избежать ошибок, можно применить автоматически регулируемое приспособление, регистрирующее движение пластины.

Уплотнение достигается с помощью вибростола с дебалансом, вращающимся со скоростью 3000 об/мин, и максимальным ускорением от 3 до 4 g. При этом принимается, что расход энергии, необходимой для уплотнения, является мерой удобоукладываемости и выражается условно в секундах Вебе, т. е. временем, необходимым для полного изменения формы. Иногда применяют поправку на изменение объема бетона от  $V_2$  до вибрации до  $V_1$  после вибрации, умножая время уплотнения на  $\frac{V_2}{V_1}$ .

Испытание по Вебе — хороший лабораторный метод, особенно для очень жестких смесей. Этим он отличается от метода определения коэффициента уплотнения, где ошибки могут возникать вследствие прилипания жестких смесей к стенкам воронок. Проба Вебе дает также дополнительные преимущества, так как обработка бетона при этом испытании весьма сходна с методами его укладки на практике.

### МЕТОД ПЕНЕТРАЦИИ ШАРА

Это очень простое полевое испытание, состоящее в определении глубины, на которую металлическая полусфера диаметром 15,2 см и весом 13,6 кг проникает под влиянием собственной тяжести в бетонную смесь.

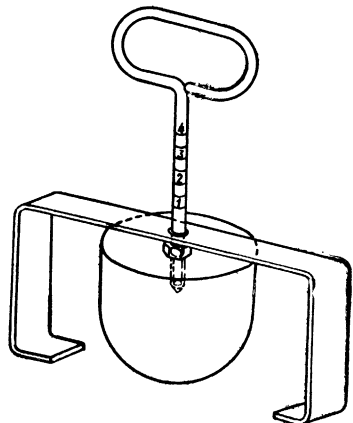


Рис. 4.7. Шар Келли

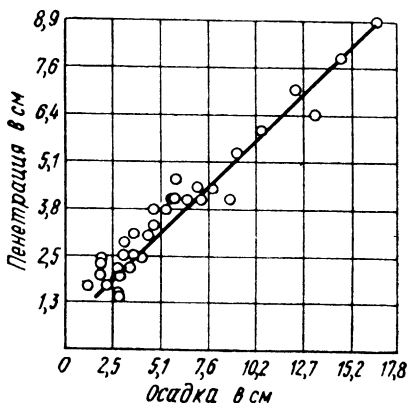


Рис. 4.8. Соотношение между пенетрацией, определяемой с помощью шара Келли, и осадкой конуса

Такое приспособление, сконструированное Келли и известное под названием шар Келли, показано на рис. 4.7.

Данный метод, так же, как и определение осадки конуса, применяется для текущего контроля консистенции. Метод разработан в США и узаконен стандартом ASTM C 360—55T, в Англии этот метод до сих пор не применяется. Метод шара может заменить испытание осадки конуса, так как он более прост, легко выполняется и, что еще более важно, его можно использовать при транспортировании бетона или даже в опалубке. Во избежание побочных эффектов глубина исследуемого бетона должна быть не менее 20,3 см, а наименьший поперечный размер должен быть 45,7 см. Как и следовало ожидать, нет простой корреляции между пенетрацией шара и осадкой конуса, так как оба метода не измеряют основных свойств бетонной смеси, а только показывают его реакцию на определенные условия. На строительстве при применении бетонной смеси определенного состава можно найти корреляцию, как показано, например, на рис. 4.8. Практически испытание с шаром обычно применяют для определения колебаний консистенции смеси, например вследствие изменения влажности заполнителя.



## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИИ

Следует с самого начала отметить, что никакое истинное сравнение невозможно, так как каждым методом определяется поведение бетонной смеси в различных условиях. Особенности применения каждого метода уже упоминались.

Испытание уплотнения тесно связано с величиной, обратной удобоукладываемости, а метод изменения формы и метод Вебе являются прямыми функциями удобоукладываемости. Проба Вебе определяет свойства бетонной смеси при вибрировании по сравнению с условиями свободного падения при определении коэффициента уплотнения и встряхиванием при испытании на изменение формы. Все три метода пригодны в лабораторных условиях, а аппарат для определения коэффициента уплотнения наиболее пригоден для применения непосредственно на строительстве. Зависимость между коэффициентом уплотнения и временем Вебе дана на рис. 4.9, но она применима только к испытанным смесям и ее не следует обобщать. Для специальных составов отношение между коэффициентом уплотнения и осадкой конуса было также установлено, но, поскольку такое отношение является функцией свойств смеси, цифры здесь не приводятся.

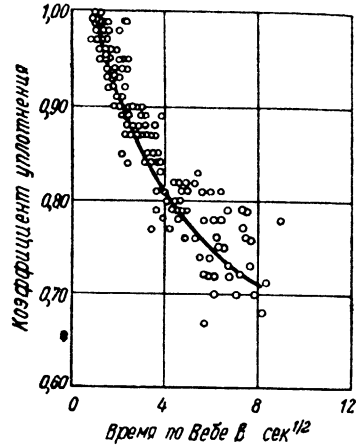


Рис. 4.9. Соотношение между коэффициентом уплотнения и временем по Вебе

Испытание пластичности весьма важно для оценки связности смесей в лабораторных условиях.

Осадка конуса и пенетрация шара являются чисто сравнительными методами и очень полезны, однако осадка конуса не дает надежных результатов при тощих смесях, где очень важен хороший контроль.

Более современный метод определения удобоукладываемости еще предстоит создать. Поэтому заслуживает внимания определение удобоукладываемости визуально, с помощью заглаживания поверхности мастерком. Этот метод требует опыта, но при наличии его проба «на глаз», особенно для контроля однородности, быстра и надежна.

### **ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА УДОБУУКЛАДЫВАЕМОСТЬ**

Загустевание бетонной смеси со временем не следует смешивать с процессом схватывания цемента. В первом случае часть воды поглощается заполнителем, часть теряется при испарении, особенно если бетон подвергается воздействию солнца или ветра, часть удаляется в результате химических реакций. Коэффициент уплотнения снижается почти на

0,1 за 1 ч с момента перемешивания; точная величина потери удобоукладываемости меняется в зависимости от расхода цемента, его вида, температуры бетона и начальной удобоукладываемости. Зависимости «осадка конуса — время», полученные Эвансом, приведены на рис. 4.10.

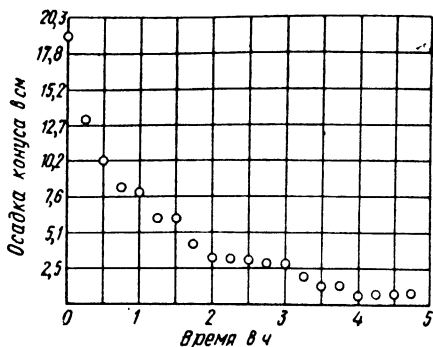


Рис. 4.10. Соотношение между осадкой конуса и временем с момента окончания перемешивания бетонной смеси состава 1:2:4 с водоцементным отношением 0,775

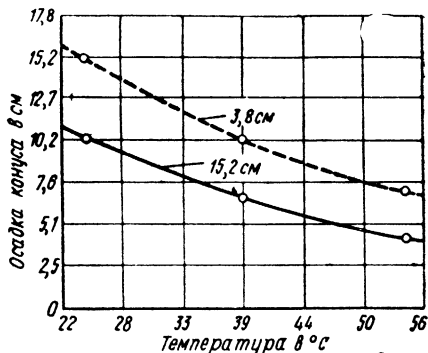


Рис. 4.11. Влияние температуры на осадку конуса бетонных смесей с разными максимальными размерами заполнителей

Ввиду быстрого изменения консистенции, а также потому, что нас интересует удобоукладываемость к моменту укладки, т. е. через некоторое время после приготовления смеси, предпочтительно проведение испытаний не ранее чем через 15 мин после приготовления бетонной смеси.

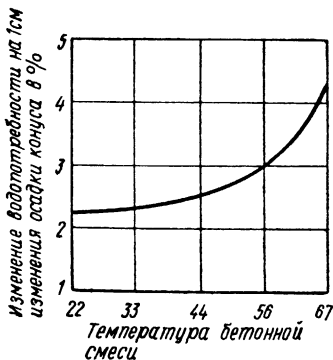


Рис. 4.12. Влияние температуры на количество воды, необходимой для изменения осадки конуса

Удобоукладываемость смеси зависит также и от температуры окружающей среды, хотя, строго говоря, мы имеем дело с температурой самого бетона. На рис. 4.11 показано влияние температуры на осадку конуса бетонной смеси, приготовленной в лаборатории: в жаркий день количество воды в бетоне следовало бы увеличивать для поддержания постоянной удобоукладываемости. На рис. 4.12 показано, что по мере повышения температуры бетонной смеси возрастает процентное содержание воды, необходимое для того, чтобы вызвать изменение осадки конуса на 2,5 см.

Интересно, что проведенные недавно в жарком климате исследования Шалон не подтвердили потерю удобоукладываемости с увеличением температуры. При повышении температуры до 40° С и при относительной влажности 20—70% влияния температуры на изменение осадки конуса не наблюдалось. Только при температуре выше 50° С или при влажности менее 20% осадка конуса быстро увеличивалась.

Мнение о том, что более высокая температура повышает водопотребность смеси или что по крайней мере уменьшение осадки конуса влияет на водопотребность, до сих пор полностью не подтверждено. Эти данные справедливы при температуре до 40°С и в течение 20 мин перемешивания. За более длительный период наблюдается несомненное уменьшение осадки конуса, так что, например, при длительной перевозке готовой бетонной смеси высокая температура будет увеличивать водопотребность при данной удобоукладываемости.

Несоответствие между упомянутыми испытаниями в натуральных условиях и в лаборатории может, по-видимому, объясняться применением в последнем случае бетона с воздухововлекающими добавками: возможно, имеется какое-то взаимодействие между вовлеченным воздухом, цементом и климатом. Полный ответ на этот вопрос не известен и рекомендуется для каждого новых условий проводить натурные испытания.

### **РАССЛАИВАНИЕ БЕТОНА**

Ранее указывалось, что бетонная смесь не должна легко расслаиваться, т. е. должна быть связной. Однако отсутствие склонности к расслоению не входит в определение удобообрабатываемости смеси. Тем не менее отсутствие заметного расслоения весьма существенно, так как полное уплотнение расслаивающейся смеси невозможно.

Расслоение можно определить как разделение составляющих гетерогенной смеси, в результате чего их распределение становится неоднородным. В случае бетонной смеси главной причиной расслоения являются различия в размерах частиц и удельном весе компонентов.

Наблюдаются два вида расслоения: первый — выделяются более крупные частицы, так как они скатываются по откосам первыми и оседают больше, чем более мелкие; второй вид, наблюдаемый особенно в подвижных смесях, заключается в отделении цементного теста.

При некоторых гранулометрических составах и при применении таких смесей, если смесь слишком жесткая, может быть первый вид расслоения; при добавлении воды связность смеси улучшается. Однако если смесь становится слишком подвижной, наблюдается второй вид расслоения. Величина расслоения зависит от метода укладки и обработки бетонной смеси. Если бетонную смесь не приходится перевозить далеко и ее непосредственно из бетономешалки укладывают в форму, то опасность расслоения невелика. Падение бетонной смеси со значительной высоты, опускание ее по желобу, особенно если меняется направление, и столкновение с препятствиями — все это способствует расслоению, поэтому при таких условиях следует применять особенно связные смеси. При соответствующем обращении, транспортировании и укладке опасность расслоения может быть значительно снижена: имеется много практических рекомендаций, но они не рассматриваются в этой книге.

Следует подчеркнуть, что бетонную смесь всегда нужно укладывать в то положение, в котором она должна будет оставаться, а не следует позволять ей растекаться или перемещать ее по опалубке. Это запрещенное справедливо и при применении вибратора для распределения массы

бетона по большой поверхности. Вибрирование является ценнейшим методом уплотнения бетона, но ввиду того что на бетон при этом передается большое усилие, опасность расслоения при укладке вследствие неправильного применения вибратора возрастает. Это наблюдается особенно часто при слишком долгой работе вибратора; во многих смесях может произойти оседание крупных частиц на дно опалубки и перемещение цементного теста кверху. Такой бетон будет, очевидно, слабым, и выделение цементного молока на его поверхности будет обильным, вследствие чего на поверхности могут образоваться трещины.

Следует заметить, что вовлеченный воздух уменьшает опасность расслоения. С другой стороны, применение крупного заполнителя с удельным весом, сильно отличающимся от удельного веса мелкого заполнителя, приводит к увеличению расслоения.

Расслоение трудно измерить количественно, но его легко заметить, если бетонная смесь укладывается каким-либо из описанных выше нежелательных способов. Хорошо отражается связность смеси при испытании на пластичность. Для определения расслоения вследствие избыточной вибрации бетонный кубик вибрируют в течение 10 мин, после чего его разламывают и изучают распределение крупного заполнителя: любое расслоение будет тотчас обнаружено.

### ВОДООТДЕЛЕНИЕ

Водоотделение является формой расслоения, при котором некоторая часть воды из смеси стремится подняться к поверхности свежееуложенного бетона. Это вызывается неспособностью твердых составных частей смеси при их оседании удерживать всю воду затворения. Пауэрс трактует водоотделение как особый случай седиментации, который можно выразить количественно как общее оседание на единицу высоты бетона. Способность к водоотделению и его скорость можно определять экспериментально по стандарту ASTM C 232—58.

В результате водоотделения поверхность каждого слоя бетона может оказаться слишком влажной и бетон в следующем слое будет пористым, слабым и недолговечным. Если отделяющаяся вода вновь перемешивается при окончательной обработке поверхности верхнего слоя, то образуется недолговечная поверхность. Этого можно избежать, если не производить окончательной отделки до полного испарения отделившейся воды, а также применять деревянные мастерки и избегать переработки поверхности. С другой стороны, если испарение воды с поверхности идет быстрее, чем водоотделение, то может произойти растрескивание вследствие пластической усадки.

Часть поднимающейся вверх воды задерживается под нижней поверхностью крупного заполнителя или арматуры, нарушая этим сцепление. Эта вода оставляет за собой капилляры, а поскольку все поры ориентированы в одном направлении, то может повыситься проницаемость бетона в горизонтальной плоскости. Небольшое количество пор такого типа имеется почти всегда, но следует избегать значительного водоотделения, при котором увеличивается опасность повреждения бетона при замо-

раживании. Водоотделение может быть значительным в тонких плитах, например плитах дорожных покрытий; именно для них мороз обычно составляет главную опасность.

Водоотделение не всегда бывает разрушительным. Если оно происходит без помех, а вода испаряется, то водоцементное отношение может понизиться, в результате чего повысится прочность<sup>1</sup>. С другой стороны, если поднимающаяся вода несет с собой значительное количество тонких частиц цемента, то образуется слой цементного молока. Если он образуется на поверхности плиты, то создается пористая, постоянно «пыльная» поверхность. На поверхности слоя бетона цементное молоко препятствует сцеплению и связи его с последующим слоем бетона, поэтому слой цементного молока следует всегда снимать щетками и смывать.

Водоотделение зависит главным образом от свойств цемента и от некоторых химических факторов. Величина водоотделения меньше, если в цементе высокое содержание щелочей,  $S_3A$ , а также при добавлении хлорида кальция. Повышение температуры увеличивает скорость водоотделения, однако общая способность к водоотделению, по-видимому, не изменяется. Физические свойства мелкого заполнителя, особенно имеющего размеры менее 0,15 мм, могут также влиять на водоотделение. Жирные смеси менее склонны к водоотделению, чем тощие. Уменьшение водоотделения может быть достигнуто введением добавок пуццоланы или алюминиевой пудры. Применение воздухововлекающих добавок значительно снижает водоотделение.

Процесс водоотделения в бетоне продолжается до тех пор, пока цементный камень не станет достаточно твердым и не прекратится седиментация.

### **ПЕРЕМЕШИВАНИЕ БЕТОННОЙ СМЕСИ**

**Бетономешалки.** Цель перемешивания — обволакивание всех частиц заполнителя цементным тестом и превращение всех ингредиентов бетонной смеси в однородную массу, которая не должна нарушаться при выгрузке смеси из бетономешалки. Способ выгрузки бетонной смеси является одним из основных принципов классификации бетономешалок. Существуют разные типы: в опрокидывающейся бетономешалке барабан для выгрузки бетона опрокидывается; в бетономешалке неопрокидывающегося типа оси всегда горизонтальны и выгрузка производится либо через желоб, вставленный в барабан, либо вращением барабана в обратном направлении, либо через прорезь в барабане. Существуют также бетономешалки лопастные и бетономешалки с барабаном, вращающимся вокруг вертикальной оси.

Бетономешалки с опрокидывающимся барабаном имеют барабан конической или чашеобразной формы с лопатками внутри. Эффективность перемешивания зависит от конструкции бетономешалки. Процесс выгрузки обычно происходит удовлетворительно, так как вся бетонная

<sup>1</sup> Водоотделение может быть полезным только в случае, если бетон после окончания водоотделения будет повторно уплотнен. (*Прим. ред.*)

смесь выгружается быстро в виде нерасслоившейся массы, как только опрокидывается барабан. Бетономешалки с опрокидывающимся барабаном предпочтительнее для смесей с низкой удобообрабатываемостью и для смесей, содержащих заполнитель крупных размеров. Из опрокидывающейся бетономешалки выгрузка идет довольно медленно и бетонная смесь может расслоиться: более крупные частицы заполнителя задерживаются в бетономешалке, так что вначале происходит выгрузка цементного раствора, а затем выгружаются покрытые цементным тестом камни. Нельзя сказать, конечно, что это общий недостаток бетономешалок с опрокидывающимся барабаном, но рекомендуется проверять в этом отношении работу бетономешалок на данной смеси. Это можно сделать путем сравнения содержания крупного заполнителя во второй и девятой из 10 частей замеса.

Неопрокидывающиеся бетономешалки обычно загружают с помощью ковша или бадьи, применяемых также для загрузки опрокидывающихся барабанов больших размеров. Важно, чтобы все содержимое ковша попадало в барабан при каждой загрузке, т. е. чтобы часть смеси не налипала на стенки. Иногда вибратор, прикрепленный к ковшу, помогает его опорожнить полностью.

Лопастные бетономешалки обычно стационарны, и потому их применяют на бетонных узлах больших строений, на заводах сборного железобетона. Такие мешалки малой емкости применяют также в лабораториях. Бетономешалка состоит в основном из круглого барабана, вращающегося вокруг своей оси, с двумя или одним рядом звездообразно расположенных лопастей, вращающихся вокруг вертикальной оси, не совпадающей с осью барабана. При неподвижном барабане лопасти вращаются по кругу вокруг оси барабана. В каждом случае относительное перемещение между лопастями и смесью одинаково, и бетонная смесь в любой части барабана тщательно перемешивается. Скребокковые лопасти не дают раствору прилипнуть к стенкам барабана, а высота лопастей может быть установлена таким образом, чтобы на дне барабана не образовывался слой раствора. Лопастные бетономешалки особенно эффективны при жестких и связных смесях, и поэтому их часто применяют при производстве сборного бетона.

Роторные бетономешалки, работающие по тому же принципу, что и лопастные, применяют, в частности, для приготовления цементных растворов. Следует отметить, что в бетономешалках барабанного типа соскабливания раствора со стенок барабана во время замеса не происходит, поэтому некоторое количество раствора остается на стенках до тех пор, пока в конце рабочего дня не производится очистка бетономешалки. Поэтому при первом замесе в бетономешалке остается значительное количество раствора и выгружаемая бетонная смесь будет содержать в основном крупный заполнитель, покрытый раствором; такой начальный замес следует выбросить. Во избежание этого можно ввести в бетономешалку некоторое количество раствора перед началом перемешивания. Указанная процедура известна под названием смазывания бетономешалки. Наиболее целесообразно вначале загрузить бетономешалку цементом, водой и мелким заполнителем. Эту смесь можно использовать

в строительстве; она пригодна для укладки в рабочих швах. О необходимости смазки бетономешалки не следует забывать при лабораторных работах.

Размер бетономешалки определяется ее объемом, и при этом обычно указывают две цифры: первая показывает объем несмешанных ингредиентов в рыхлом состоянии, вторая — объем перемешанной бетонной смеси, например 0,28/0,2, 0,40/0,28; 0,62/0,40 м<sup>3</sup> и т. д. В настоящее время обычно опускают первую цифру, как не имеющую практического значения; стандарт BS 1305:1959 дает только номинальную емкость замеса. Бетономешалки выпускают объемом от 0,04 м<sup>3</sup> (для лабораторных целей) до 4,6 м<sup>3</sup> и в исключительных случаях даже до 7,65 м<sup>3</sup>. Если смешиваемое количество представляет собой лишь небольшую часть мощности бетономешалки, то получаемая смесь может оказаться неоднородной и произведенная операция будет неэкономичной.

Интересен еще один тип бетономешалки, а именно: бетономешалка с двойным барабаном, применяющаяся при строительстве дорог. В этой бетономешалке имеются два барабана, причем бетонную смесь перемешивают часть времени в одном, а затем в другом барабане и выгружают. Операции синхронизированы, так что замесы не смешиваются между собой. Таким способом можно получить удвоенное количество бетона по сравнению с обыкновенной бетономешалкой при наличии одного и того же оборудования. При строительстве дорог, где подъезды и пространство часто ограничены, это является важным преимуществом. Применяют также бетономешалки с тремя барабанами.

Все рассмотренные до сих пор бетономешалки являются смесителями периодического действия, так как один замес бетонной смеси перемешивается и выгружается, а затем загружаются материалы для следующего замеса. Бетономешалка непрерывного действия постоянно выдает бетонную смесь и заполняется с помощью непрерывно действующих весовых дозаторов. Сама бетономешалка может быть барабанного типа или основана на вращении шнека в стационарном корпусе.

### **РАВНОМЕРНОСТЬ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ**

Для каждой бетономешалки необходимым является достаточное перераспределение материалов во всех частях камеры, чтобы получаемая бетонная смесь была однородной. Эффективность бетономешалки может быть оценена однородностью смеси, выпускаемой в несколько приемников при непрерывном потоке бетонной смеси. Например, в Бельгии смесь часто разделяют на восемь частей, которые сравнивают по однородности. Классификация эффективности перемешивания при этом базируется на данных, представленных в табл. 4.3. В таблице указаны средние отклонения (арифметическое среднее абсолютных величин отклонений от средних) и максимальные отклонения (абсолютная величина отклонения от средних).

Величины, приведенные в табл. 4.3, являются типичными для исправной бетономешалки, причем меньшие отклонения характерны для очень хорошего перемешивания, а большие — для плохого. Следует под-

Таблица 4.3. Однородность бетонной смеси в «удовлетворительной» бетономешалке

Показатель	Отклонение в %	
	максимальное	среднее
Прочность при сжатии . . . . .	10—15	4—6
Процент крупного заполнителя . . . . .	15—20	6—8
» мелкого заполнителя или цемента . . . . .	12—15	5—8

черкнуть, что приведенные цифры показывают только порядок отклонений, так как работа бетономешалки зависит от консистенции смеси и от максимальных размеров применяемого заполнителя.

Довольно жесткое испытание, иногда применяемое в США, требует, чтобы пробы бетона брались из второй и девятой части из 10 частей замеса; различия свойств этих двух проб не должны превышать ни одного из следующих показателей:

плотность бетона . . . . .	16,2 кг/м <sup>3</sup>
содержание воздуха . . . . .	1%
осадка конуса . . . . .	1,9 см (хотя для бетона с осадкой конуса более 7,6 см допустимы и бóльшие отклонения)
процент заполнителя, остающегося на сите с отверстием 0,5 мм	6%
прочность при сжатии . . . . .	средняя 7-суточная прочность любого образца не должна отличаться от средней прочности всех цилиндров более чем на 7,5%

### **ВРЕМЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ**

На строительной площадке обычно стремятся перемешивать бетон как можно скорее, и, следовательно, очень важно знать, каково минимальное время перемешивания для получения бетона, однородного по структуре и удовлетворительного по прочности. Это время меняется в зависимости от типа бетономешалки, и, строго говоря, критерием адекватного перемешивания является не время перемешивания, а число оборотов бетономешалки. Обычно бывает достаточно около 20 оборотов. Однако, поскольку имеется оптимальная скорость вращения, рекомендуемая предприятием, производящим бетономешалки, то число оборотов и время перемешивания являются взаимозависимыми.

Для данного типа бетономешалки существует связь между временем перемешивания и однородностью смеси. Данные, представленные на рис. 4.13, основаны на исследованиях Шалон, где однородность характеризуется пределами прочности образцов бетона, приготовленных из данной смеси после определенного времени перемешивания. На рис. 4.14 даны результаты тех же испытаний, вычисленные как изменение коэффициента вариаций прочности в зависимости от времени перемешивания. Очевидно, что перемешивание в течение менее 1—1,2 мин дает заметно



более неоднородный бетон; увеличение времени перемешивания сверх этого срока влияет незначительно.

Средняя прочность бетона возрастает с увеличением времени перемешивания, как показано, например, в опытах Абрамса (рис. 4.15). Скорость возрастания прочности быстро уменьшается при времени переме-

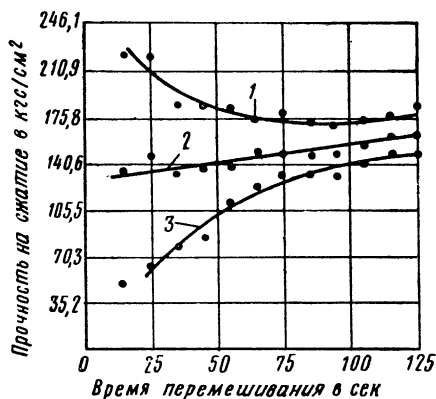


Рис. 4.13. Соотношение между прочностью на сжатие и временем перемешивания

время перемешивания: 1 — максимальное; 2 — среднее; 3 — минимальное

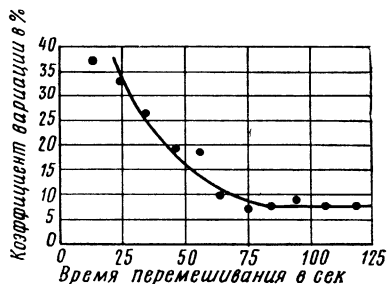


Рис. 4.14. Соотношение между коэффициентом вариаций прочности и временем перемешивания

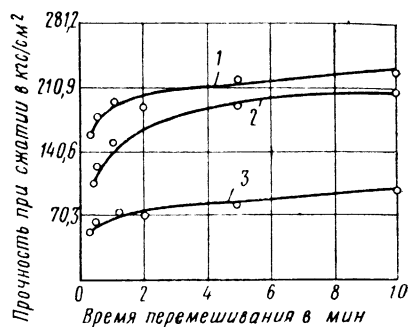


Рис. 4.15. Влияние времени перемешивания на прочность бетона  
испытание в возрасте: 1 — 2 мес.; 2 — 28 сут.; 3 — 7 сут.

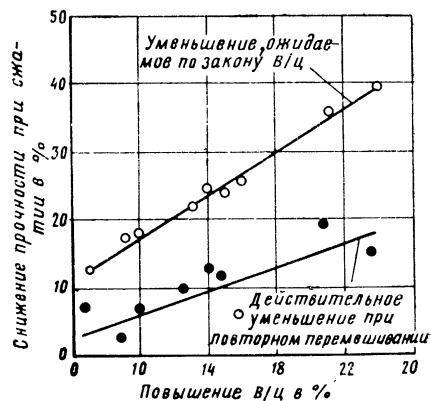


Рис. 4.16. Влияние количества воды, добавляемой при повторном перемешивании, на прочность

шивания свыше 1 мин. В пределах первой минуты, однако, влияние времени перемешивания на прочность довольно велико. Например, Шалон подсчитано, что для данной требуемой прочности время перемешивания от 30 сек до 1 мин дает возможность сэкономить цемент в количестве около 0,65 мешка на 1 м<sup>3</sup>.

Как указывалось ранее, точное значение минимального времени перемешивания варьирует в зависимости от типа бетономешалки и зависит также от ее размеров. В табл. 4.4 даны некоторые рекомендации.

Таблица 4.4. Рекомендуемое минимальное время перемешивания

Мощность бетономешалки в м <sup>3</sup>	Время перемешивания в мин	
	Биро рекламаций	Американский институт бетона
До 0,76	1,5	1
1,53	1,5	1,25
2,92	2	1,5
3,06	2,5	1,75
3,82	2,75	2
4,58	3	2,25

Время перемешивания считается с момента, когда все твердые материалы были заложены в бетономешалку, и обычно указывается, что все количество необходимой воды должно быть добавлено не позже чем через  $\frac{1}{4}$  времени перемешивания. Приведенные цифры относятся к обычным бетономешалкам. Недавно были введены в практику скоростные бетономешалки, в которых время перемешивания может быть сокращено до 35 сек. С другой стороны, если применяют легкий заполнитель, то время перемешивания должно быть не менее 5 мин; иногда 2 мин идут на перемешивание заполнителя с водой, 3 мин — на перемешивание с добавленным цементом.

Не существует каких-либо твердых правил загрузки составляющих бетонной смеси в бетономешалку, так как это зависит от свойств смеси и типа бетономешалки. Обычно сначала вливают небольшое количество воды, затем в бетономешалку загружают по возможности однородные твердые материалы. Желательно загружать материалы одновременно. Если возможно, большую часть воды заливают в это время, а остаток воды добавляют после загрузки твердых материалов. Однако при работе с некоторыми барабанными бетономешалками, когда применяют очень сухую смесь, необходимо вначале подать некоторое количество воды и крупного заполнителя, так как в противном случае его поверхность не будет достаточно увлажненной. В маленьких лабораторных бетономешалках и при очень жестких смесях оказалось удобным подавать сначала песок, часть крупного заполнителя, цемент, затем воду и, наконец, остатки крупного заполнителя, чтобы разбить образующиеся скопления раствора.

При перемешивании в течение длительного времени обычно происходит испарение воды из смеси с последующим уменьшением удобоукладываемости и увеличением прочности. Дополнительным эффектом является размельчение заполнителя, особенно если он мягкий; при этом гранулометрический состав заполнителя становится более мелким, а удобоукладываемость уменьшается. Действие трения также вызывает увеличение температуры смеси.

При применении бетона с воздухововлекающими добавками более длительное перемешивание уменьшает содержание воздуха приблизи-

тельно на  $\frac{1}{6}$  часть в час (в зависимости от воздухововлекающей добавки), тогда как задержка укладки без длительного перемешивания вызывает снижение содержания воздуха на  $\frac{1}{10}$  часть в час.

Прерывистое повторное перемешивание в течение приблизительно 3 ч, а в некоторых случаях и до 6 ч является безвредным с точки зрения прочности долговечности бетона, но удобоукладываемость со временем уменьшается, если не предотвратить потерю влаги из бетономешалки. При добавлении воды для восстановления удобоукладываемости (этот процесс известен под названием повторного перемешивания) снижается прочность бетона. Однако потеря прочности меньше, чем можно было бы ожидать, исходя из величины общего водоцементного отношения (рис. 4.16). Влияние повторного перемешивания на усадку не выяснено.

### **ВИБРИРОВАНИЕ БЕТОНА**

Процесс уплотнения бетона состоит в основном в удалении вовлеченного воздуха. Самым старым способом для достижения этого является трамбование поверхности бетона, чтобы выдавить из него воздух и добиться большего сближения твердых частиц. Более современным способом является вибрирование, при котором частицы отделяются одна от другой, что позволяет образовать более компактную массу.

Применение вибрирования позволяет применять более жесткие смеси, чем при ручном уплотнении (коэффициент уплотнения менее 0,75 или от 0,8 до 0,6, когда уже требуется также и давление). Практически могут быть хорошо обработаны вибрированием чрезвычайно сухие и жесткие смеси, так что бетон требуемой прочности может быть получен при меньшем расходе цемента. Это означает экономию в стоимости, но при этом необходимо учитывать стоимость оборудования для вибрирования, а также более тяжелой и прочной опалубки. В этом случае стоимость затрат труда, по-видимому, будет решающим фактором, если выбор будет основываться только на стоимости. Что же касается качества бетона, то и вибрирование, и уплотнение вручную при наличии хороших смесей и высокого мастерства дают прекрасный бетон. Однако при этих методах уплотнения может быть и плохой бетон: в случае уплотненного вручную бетона недостаточное уплотнение является наиболее частой ошибкой; при применении вибрирования чаще возникает вероятность того, что оно будет неодинаково по всей массе бетона, поэтому некоторые участки окажутся неполностью уплотненными, а другие подвергнутся расслоению в результате избыточного вибрирования. Однако при наличии достаточно жестких смесей с хорошо подобранным гранулометрическим составом побочное действие избыточного вибрирования может быть в значительной степени устранено.

Уже упоминалось, что два основных метода уплотнения требуют наличия смесей с различной удобоукладываемостью: слишком жесткая смесь не может быть достаточно обработана вручную и, наоборот, слишком подвижную смесь не следует обрабатывать вибрированием, так как может произойти расслоение. Это следует иметь в виду, например, при подаче смесей бетононасосами. Такие смеси могут быть слишком пла-

стичными для вибрирования. Различные вибраторы требуют разной консистенции бетонной смеси для наиболее эффективного уплотнения, поэтому следует сочетать консистенцию бетона с характеристиками имеющихся в наличии вибраторов.

### ГЛУБИННЫЕ ВИБРАТОРЫ

Этот тип вибраторов из имеющихся нескольких типов является, по видимому, самым распространенным. Он состоит из булавы, в которой находится эксцентрик, соединенный гибким валом с мотором. Булава погружается в бетон и действует на него с приблизительно гармоническими усилиями, отсюда и название — глубинный вибратор, или вибробулава. Частота вибрирования может достигать до 12 000 циклов в минуту; частота от 3000 до 5000 считается минимумом при ускорении не менее 4 *g*.

Вибратор легко перемещается с места на место и обрабатывает участки в радиусе от 0,6 до 0,9 м в течение 5—30 сек в зависимости от консистенции смеси, хотя для некоторых смесей требуется до 2 мин. Практически полное уплотнение может быть установлено по виду поверхности бетона, которая не должна быть пористой и не должна содержать избытка раствора. Рекомендуется постепенное удаление вибратора со скоростью около 8 см/сек, чтобы отверстие, оставленное им, полностью заплыло и не был задержан воздух. Вибратор следует погружать на всю глубину свежеложенного бетона и в слой, расположенный ниже, если он еще пластичен или может стать пластичным вновь. Таким образом, устраняется зона контакта, являющаяся слабым местом на стыке двух слоев, и создается монолитный бетон. При толщине слоя более 0,6 м вибратор не может полностью удалить воздух из нижних частей слоя.

Глубинные вибраторы сравнительно эффективны, так как вся энергия от них передается непосредственно бетонной смеси. Вибраторы выпускаются минимальным диаметром — до 2 см, так что их можно применять даже при обработке бетона в конструкциях с большим процентом армирования и труднодоступных участков. Глубинный вибратор не удаляет пузырьки воздуха из слоя бетонной смеси, граничащей с опалубкой, так что необходимо «прорезание» вдоль стенки формы и в углах плоской пластиной. Очень полезно в этих случаях применение водопоглощающей опалубки, но она очень дорога.

### НАРУЖНЫЕ ВИБРАТОРЫ

Вибратор этого типа жестко крепится к опалубке, покоящейся на эластичной основе, так что вибрируются и опалубка, и бетон. В результате этого значительное количество работы затрачивается на вибрирование опалубки, которая должна быть прочной и хорошо закрепленной, чтобы предупредить ее повреждение и утечку раствора.

Принцип работы поверхностного вибратора таков же, как и глубинного, но частота обычно колеблется в пределах 3000—6000 кол/мин, хотя некоторые вибраторы достигают 9000 кол/мин. Выходная мощность варьирует от 80 до 1100 вт.

Наружные вибраторы применяют при производстве сборных бетонных панелей, часто имеющих такую толщину и форму, что глубинный вибратор не может быть использован.

При применении наружного вибратора бетонную смесь следует укладывать слоями определенной толщины, так как в противном случае воздух не может выделиться через слишком большую толщу бетона. Положение вибратора по мере бетонирования необходимо изменять.

Портативные, незакрепленные наружные вибраторы могут применяться на участках, не доступных для другой обработки, но степень уплотнения с помощью вибратора такого типа весьма ограничена. К этому типу относится электрический молот, иногда используемый для уплотнения образцов бетона.

### ВИБРОСТОЛЫ

В этом случае опалубка (форма) крепится к вибратору, а не наоборот, но принцип совместного вибрирования бетонной смеси и опалубки остается неизменным.

Источник вибрирования тоже аналогичный. Обычно быстро вращающийся эксцентрический груз сообщает столу вибрирование с круговым движением<sup>1</sup>. При наличии двух валов, вращающихся в противоположных направлениях, горизонтальный компонент вибрирования нейтрализуется и столу сообщается только простое гармоничное движение в вертикальном направлении. Существуют также вибростолы, управляемые электромагнитом, питающимся переменным током. Диапазон частот варьирует от 1500 до 7000 *циклов/мин*. Оптимальное ускорение составляет 4 *g*—7 *g*. Считают, что примерно 1,5 *g* и амплитуда  $\sim 4 \times 10^{-3}$  *см* являются необходимым минимумом для уплотнения, но при этих значениях необходимо продолжительное вибрирование. Для простого гармоничного движения связь амплитуды *a* и частоты *f* дается следующим уравнением: ускорение равно  $a(2\pi f)^2$ .

Если надо вибрировать участки бетона различных размеров, а также в лаборатории, применяют вибростол с меняющейся амплитудой. Меняющаяся частота вибрирования создает дополнительные преимущества.

На практике частоту редко меняют во время процесса уплотнения, но, по крайней мере теоретически, имеются значительные преимущества в увеличении частоты и уменьшении амплитуды в процессе уплотнения бетонной смеси. Основанием для этого является тот факт, что вначале частицы смеси находятся довольно далеко друг от друга и придаваемое им движение должно быть соответствующей величины. После того как уже произошло частичное уплотнение, более высокая частота позволяет добиться большего количества движений в данный отрезок времени; уменьшение амплитуды означает, что движения не являются слишком большими для оставшегося между частицами пространства. Вибрирова-

<sup>1</sup> В настоящее время в СССР разработаны и применяются вибраторы и вибростолы с различной формой колебаний, в том числе с продольными колебаниями и поличастотные резонансные. (*Прим. ред.*)

ние при слишком большой амплитуде по отношению к расстояниям между частицами приводит к тому, что смесь постоянно остается в пластичном состоянии и полное уплотнение никогда не достигается.

Вибростол является надежным методом уплотнения сборного железобетона, его преимущество заключается в том, что он производит одинаковую обработку бетонной смеси.

Вариантом вибростола является ударный стол, применяемый на некоторых заводах сборного бетона в Англии и более часто в Голландии и Дании. Принцип этого процесса уплотнения значительно отличается от высокочастотного вибрирования, описанного выше: на ударном столе производятся резкие вертикальные толчки со скоростью около 200 раз в минуту. Толчки производятся вертикальным падением стола примерно на 1,25 см, достигаемым с помощью кулачков. Бетонная смесь помещается в опалубке тонкими слоями по мере обработки; метод дает чрезвычайно хорошие результаты, но, несмотря на то, что существует уже 40 лет, применяется мало.

Для различных целей были разработаны различные типы вибраторов, о которых будет упомянуто кратко.

В поверхностном вибраторе вибрирование осуществляется через плоскую плиту, помещенную на поверхность бетона. При этом способе бетон сжимается во всех направлениях, способность его к расслоению ограничена, что позволяет применять более интенсивное вибрирование.

Электрический молот может применяться как поверхностный вибратор, если его снабдить большой плоской поверхностью, например  $10,2 \times 10,2$  см; это один из основных способов уплотнения пробных кубиков.

Виброкатки используют для уплотнения тонких плит. При дорожном строительстве применяют различные вибробрусы и катки. Механическую гладилку применяют в основном для полов из гранолита, чтобы связать слои гранолита с основной массой бетона. Этот способ является скорее способом отделки, чем уплотнения бетона.

## ПОВТОРНОЕ ВИБРИРОВАНИЕ

Обычно вибрирование бетонной смеси производят тотчас после укладки, так что уплотнение полностью заканчивается до загустевания бетона. Все предыдущие разделы относятся к этому типу вибрирования.

Упомянулось, что для получения хорошего сцепления между слоями верхнюю часть нижележащего слоя следует вибрировать повторно при условии, что нижний слой сохраняет пластичное состояние; таким способом можно устранить усадочные трещины и эффект внутреннего водоотделения.

Успешное применение повторного вибрирования позволяет поставить вопрос, не следует ли применять его более часто. На основании экспериментальных данных очевидно, что бетон можно успешно подвергать повторному вибрированию на протяжении около 4 ч с момента перемешивания. Повторное вибрирование через 1—2 ч после укладки приводит к увеличению 28-суточной прочности на сжатие, как показано на рис. 4.17. Данные приводятся для одинаковой продолжительности вибри-

рования сразу после укладки, частично во время ее, а частично через определенное время после ее окончания. Отмечено увеличение прочности примерно на 14%, но истинные значения зависят от удобоукладываемости смеси и от деталей процесса. Обычно повышение прочности бывает более выражено в раннем возрасте и является наибольшим в бетоне с сильным водоотделением, так как лишняя вода удаляется при повторном вибрировании, что также значительно улучшает сцепление бетона с арматурой. Возможно также, что некоторое увеличение прочности является результатом уменьшения усадочных напряжений вокруг зерен заполнителя.

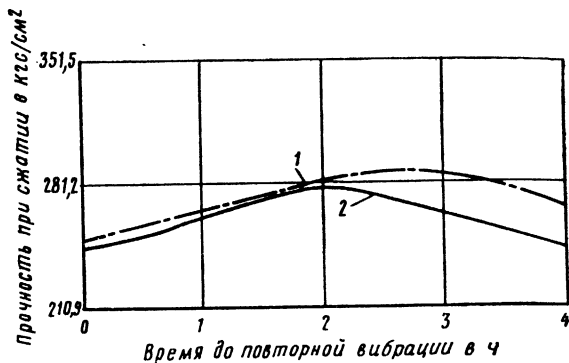


Рис. 4.17. Соотношение между 28-суточной прочностью на сжатие и временем до повторного вибрирования

1 — бетон с воздухововлекающими добавками; 2 — бетон без добавок

Несмотря на эти преимущества, повторная вибрация широко не применяется, так как она означает дополнительный этап в производстве бетона и этим увеличивает его стоимость.

### **БЕТОНИРОВАНИЕ В ЖАРКУЮ ПОГОДУ**

Существуют особые проблемы бетонирования при жаркой погоде, возникающие вследствие как высокой температуры бетона, так и усиленного испарения воды из свежеложенной смеси. Эти проблемы связаны с перемешиванием, укладкой и уходом за бетоном.

Повышение температуры свежеложенного бетона приводит к более быстрой гидратации, а следовательно, и к ускоренному схватыванию и меньшей прочности затвердевшего бетона. Кроме того, быстрое испарение может привести к пластической усадке и образованию волосных трещин в бетоне, а последующее охлаждение затвердевшего бетона вызывает растягивающие напряжения. Обычно считают, что пластическая усадка возможна, если скорость испарения превышает скорость водоотделения на поверхности. Однако недавно было показано, что трещины образуются и под слоем воды и лишь становятся заметными после высыхания. На основании этого можно предположить, что растрескивание связано с различной усадкой свежеложенного бетона, вызванной наличием препятствий усадке, таких, как крупный заполнитель или арматура. С другой стороны, снижение относительной влажности внешней среды также вызывает растрескивание. В любом случае тонкостенные конструкции, такие, как покрытия-оболочки, не следует бетонировать в условиях жаркого и сухого климата.

Пластическая усадка, по-видимому, связана с некоторыми физическими характеристиками цемента, но эта проблема в полном объеме еще подлежит изучению.

Имеются и другие осложнения при приготовлении бетона в условиях жаркого климата: воздухововлечение становится более трудным, хотя с этим можно бороться, употребляя большие количества воздухововлекающих добавок. Уход за бетоном также создает дополнительные проблемы, так как вода, которой увлажняют бетон, быстро испаряется. Использование различных пленкообразующих средств при уходе за бетоном недостаточно, это ведет к снижению его прочности на сжатие по сравнению с применением постоянного увлажнения. Некоторые экспериментальные данные приведены в табл. 4.5.

**Таблица 4.5. Влияние условий твердения на 56-суточную прочность на сжатие бетона, приготовленного в условиях пустыни**

Водоцементное отношение	Отношение заполнитель: цемент	Уход за бетоном	Относительная прочность на сжатие в % для бетона, приготовленного		
			утром (27,8 °С, относительная влажность 40%)	в полдень (37,8 °С, относительная влажность 18%)	вечером (32,8 °С, относительная влажность 25%)
0,92	7,6	Нет	100	100	100
		Обычный изоляционный материал	118	117	108
		Белый изоляционный материал	118	117	108
		7-суточное постоянное увлажнение	153	141	145
0,72	6,1	Нет	100	100	100
		Обычный изоляционный материал	127	106	110
		Белый изоляционный материал	121	122	110
		7-суточное постоянное увлажнение	127	148	141

Могут быть применены некоторые простые меры, снижающие температуру бетона. Содержание цемента должно быть минимальным, чтобы теплота гидратации не повышала и без того высокую температуру окружающей среды. Температура свежеложенного бетона может быть снижена предварительным охлаждением одной или более составляющих смеси. Например, можно применять лед вместо некоторого количества воды для замеса, но при этом необходимо, чтобы лед полностью растаял до окончания перемешивания. Охлаждение заполнителя более затруднительно и вследствие низкой удельной теплоемкости камня менее эффективно. Все применяемые материалы должны быть защищены от прямых солнечных лучей.



Температура бетонной смеси может быть легко вычислена по температуре составляющих в следующей формуле:

$$T = \frac{0,2 (T_a w_a + T_c w_c) + T_w w_w}{0,2 (w_a + w_c) + w_w},$$

где  $T$  — температура в град;  $w$  — вес составляющих на единицу объема бетона, а индексы  $a$ ,  $c$  и  $w$  относятся к заполнителю, цементу и воде соответственно.  $0,2 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$  — приблизительное значение удельной теплоемкости сухих ингредиентов.

Фактическая температура бетона будет несколько выше, чем полученная из этого уравнения, вследствие механической работы, производимой при перемешивании. Далее температура будет возрастать от тепла, выделяемого при смачивании и гидратации цемента. Для получения более точной картины мы можем считать, что если водоцементное отношение в смеси равно 0,5, а отношение заполнитель : цемент равно 5,6, то снижение температуры бетонной смеси на  $0,6^\circ$  может быть достигнуто либо путем понижения температуры цемента на  $5^\circ$ , либо температуры воды на  $2^\circ$ , либо температуры заполнителя на  $0,9^\circ$ . Отсюда ясно, что вследствие относительно малого количества цемента в смеси его температура не является важным фактором.

Применение горячего цемента само по себе не является вредным для прочности, но предпочтительно не применять горячий цемент при температурах выше  $75^\circ \text{C}$ . Это весьма интересное утверждение, так как на горячий цемент часто смотрят с опаской и различные побочные действия иногда приписывают его применению. Однако если горячий цемент увлажнить небольшим количеством воды прежде, чем он будет равномерно перемешан с заполнителями, он может быстро схватиться и скомковаться.

Влияние температуры во время затвердевания на прочность в более позднем возрасте будет обсуждено ниже; здесь достаточно упомянуть, что предпочтительна температура от  $16$  до  $32^\circ \text{C}$ .

### **ТОВАРНЫЙ БЕТОН**

---

Если вместо дозировки и перемешивания на строительной площадке бетон доставляется готовым для укладки с завода, то его называют готовой бетонной смесью, или товарным бетоном. Этот вид бетона применяется широко во многих странах, так как он имеет много преимуществ по сравнению с классическим методом его приготовления.

Товарный бетон применим на тесных площадках или при дорожном строительстве, где мало места для бетономешалок и для больших складов заполнителя, но, по-видимому, самым большим преимуществом товарного бетона является то, что он может быть приготовлен в условиях лучшего контроля, чем тот, который возможен на любой, даже большой строительной площадке. Контроль должен быть усиленным, но, поскольку бетонный завод работает в условиях, близких к фабричным, на нем возможен действительно строгий контроль всех операций. Достаточная осторожность при транспортировании бетона обеспечивается также при-

менением автобетономешалок, но укладка и уплотнение остаются на ответственности персонала площадки. Товарный бетон можно считать по природе более близким к фабричному продукту, почти сравнивать его со сталью, так как неоднородность свойств, связанная с приготовлением бетона на месте, здесь устраняется.

Применение товарного бетона также весьма выгодно в случаях, когда нужны лишь небольшие количества бетона или когда бетон укладывают только через определенные интервалы. Обычно цена товарного бетона несколько выше, чем бетона, приготовленного на строительной площадке, но это может перекрываться экономией на цементе, а также экономией на организации площадки и штатах технического надзора.

Имеются два вида товарного бетона. Первый вид — перемешивание производится на бетонном заводе и бетонная смесь затем транспортируется

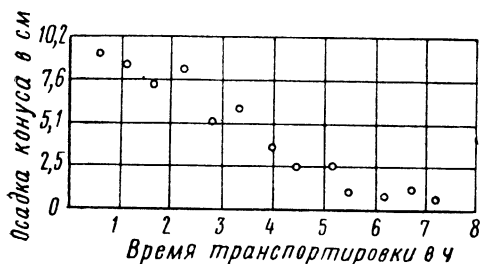


Рис. 4.18. Уменьшение осадки конуса при перемешивании со скоростью 4 об/мин

в грузовиках-бетоновозах, емкость которых медленно вращается, чтобы предупредить расслоение и нежелательную жесткость бетонной смеси. Такой бетон известен под названием заводского бетона. Второй вид — бетонная смесь, изготавливаемая на ходу (транспорт-бетон). В этом случае материалы замешивают на центральном бетонном заводе, но перемешивают их либо по дороге к строительной площадке

в автобетономешалке, либо перед выгрузкой бетона. Перемешивание в дороге допускает длительное транспортирование и менее чувствительно к задержкам, но емкость грузовика, употребляемого в качестве бетономешалки, составляет около  $\frac{3}{4}$  емкости такого же грузовика, применяемого только для домешивания заводской бетонной смеси. Иногда бетонную смесь перемешивают на бетонном заводе частично, с целью увеличения емкости бетоновозов. Перемешивание заканчивается во время перевозки.

Следует отметить, что домешивание отличается от перемешивания только скоростью вращения бетономешалки: скорость домешивания — в пределах 2—6 об/мин, скорость перемешивания — 4—16 об/мин; таким образом, оба этих процесса частично перекрываются.

Описание деталей оборудования бетонного завода не входит в содержание данной книги; достаточно лишь сказать, что они обычно в значительной степени автоматизированы. В бетономешалке большой емкости может замешиваться до 8 ингредиентов, при этом их количество точно распределяется и автоматически регистрируется для контроля. Для всего этого процесса нужен только один оператор.

Основной проблемой при производстве товарного бетона является поддержание удобоукладываемости смеси до момента укладки. Бетонная смесь со временем теряет подвижность (рис. 4.18), а работа с товар-

ным бетоном часто занимает много времени. Жесткость также может увеличиваться от продолжительного перемешивания и высокой температуры. В случае транспорт-бетона воду не следует добавлять почти до самого начала перемешивания, а время, в течение которого цемент и влажный заполнитель могут находиться в контакте, должно быть ограничено примерно 90 мин.

Многие нормы приводят такой же предел времени перевозки товарного бетона. Обычно принято ограничивать общее число оборотов во время перемешивания и встряхивания примерно до 300. Однако встряхивание до 6 ч не оказывает необратимого влияния на прочность бетона при условии, что смесь остается достаточно удобоукладываемой для полного уплотнения. Тем не менее если начальная удобоукладываемость невелика, то повышение жесткости, вызванное длительным встряхиванием, приведет к получению бетона с очень низкой удобоукладываемостью. По этой причине бетон иногда повторно перемешивают с добавлением воды перед самой выгрузкой и таким образом восстанавливают удобоукладываемость, но следует реально представлять, что получаемая в результате этого прочность на сжатие будет изменяться в зависимости от количества воды, добавленного к смеси (см. рис. 4.16).

### **БЕТОННАЯ СМЕСЬ ДЛЯ ПОДАЧИ БЕТОНОНАСОСОМ**

Поскольку в книге описывают в основном свойства бетона, то детали способов его транспортирования и укладки не рассматриваются. Однако следует сделать исключение для случая подачи бетонной смеси насосом, так как этот метод транспортирования требует применения смеси с особыми свойствами.

Оборудование состоит из воронки, в которую бетонная смесь выгружается из бетономешалки, бетонного насоса типа, показанного на рис. 4.19, и бетоноводов, через которые перекачивают смесь.

Обычно применяют насосы прямого действия горизонтального поршневого типа с полуповоротными клапанами, установленными таким образом, чтобы проходили самые крупные частицы заполнителя; при этом клапаны полностью не закрываются. Бетонная смесь поступает в насос под тяжестью собственного веса и частично засасывается во время всасывания. Заслонки открывают и закрывают с определенными паузами, поэтому бетон продвигается серией импульсов, но бетоновод всегда остается заполненным.

Бетон можно нагнетать на 400—500 м по горизонтали, или на 42,5 м (140 футов) вертикально, или же на пропорциональные отношения расстояния и высоты. Нагнетание бетонной смеси возможно и на большие

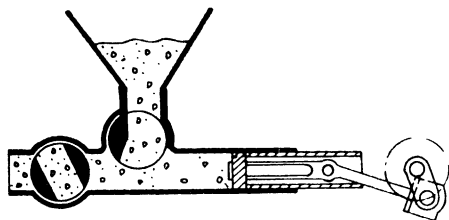


Рис. 4.19. Бетоннасос

расстояния. Когда применяются поворотные колена, следует учитывать потерю напора в них.

Имеются насосы разного размера и трубы разного диаметра, но диаметр трубы должен быть по крайней мере в три раза больше размеров самого крупного заполнителя. При применении трубы диаметром 15,2 см можно получать выход бетона до 19 м<sup>3</sup> в час. Подача бетона насосом является экономичной только в том случае, когда она производится в течение длительного времени непрерывно, так как в начале каждого периода работы насоса трубы необходимо смазывать цементным раствором (в количестве 0,25 м<sup>3</sup> на 100 пог. м при трубе диаметром 15,2 см). В конце каждой операции необходимы значительные усилия для очистки труб. Однако замены в системе труб можно производить очень быстро, так как они имеют специальные соединения.

Основным преимуществом подачи бетонной смеси насосом является то, что смесь может быть доставлена на место на большую площадь, которую иным путем обеспечить бетоном невозможно. При этом бетонный завод может быть расположен в стороне, что особенно ценно на стесненных строительных площадках или в специальных случаях, например при облицовке тоннелей. Бетонную смесь подают насосом непосредственно из бетономешалки в опалубку, что позволяет избежать двойной работы. Укладку можно производить со скоростью, соответствующей поступлению смеси из бетономешалки, и этому не мешает нехватка транспорта и оборудования для укладки.

Кроме того, бетонная смесь, подаваемая насосом, не расслаивается, хотя она и должна удовлетворять определенным требованиям, чтобы ее можно было перекачивать. Следует добавить, что бетонную смесь неудовлетворительного качества нельзя подавать насосом, поэтому любой бетон такого рода является удовлетворительным с точки зрения его свойств в свежеприготовленном состоянии.

Прежде всего бетон должен быть хорошо перемешан до загрузки в насос и иногда вторично перемешан в воронке с помощью мешалки. Смесь не должна быть грубой или липкой, слишком сухой или слишком влажной, т. е. ее консистенция должна быть оптимальной. Средняя смесь должна иметь отношение заполнитель: цемент не выше 7. Рекомендуемая осадка конуса 3,8—10 см, коэффициент уплотнения около 0,9—0,95. Нагнетание насосом само по себе вызывает некоторое уплотнение, так что в пункте доставки осадка конуса может уменьшиться на 1,3—2,2 см.

При более низком содержании воды твердые частицы вместо продольного продвижения в виде вязкой массы в суспензии будут оказывать давление на стенки трубы. Если содержание воды оптимальное, то трение развивается только на поверхности трубы, в тонком слое смазывающего ее раствора толщиной от 0,10 до 0,25 см. Возможно, что образование смазывающей пленки происходит и вследствие того, что динамическое действие поршня передается на трубу. Величина трения зависит от консистенции смеси, но при этом не должно быть избытка воды, так как иначе наступит расслоение.

Для предупреждения отделения воды количество ее не должно превышать критических значений; важно также, чтобы было достаточное

количество мелких частиц в смеси для удержания воды. Это могут быть более мелкие частицы песка или соответствующей добавки, как, например, вулканического туфа или трасса. Некоторые тонкодисперсные материалы, включая цемент, по-видимому, также действуют как смазки на поверхность труб.

Требования к содержанию мелких частиц различны, но желательно, чтобы не менее 15—20% песка проходило через сито № 52 BS (размер отверстия 0,3 мм) и не менее 5% — через сито № 100 BS (размер отверстия 0,152 мм). С другой стороны, слишком мелкий песок или слишком большое количество песка может привести к тому, что часть раствора потечет обратно через выходной клапан при ходе всасывания. Ясно, что применение заполнителей с прерывистым гранулометрическим составом нежелательно. Можно применять щебень в качестве заполнителя, но при этом следует избегать повышения жесткости смеси в трубе вследствие поглощения воды заполнителем; применение насыщенного водой заполнителя устраняет эту опасность.

### ***РАЗДЕЛЬНАЯ УКЛАДКА БЕТОННОЙ СМЕСИ МЕТОДОМ «ПРЕПАКТ»***

---

По этому методу укладка производится в два этапа. При первой операции крупный заполнитель укладывают в опалубку и уплотняют. Пустоты между частицами, составляющие 30—35% общего объема, на втором этапе заполняют раствором. Очевидно, что заполнитель в таком бетоне имеет прерывистый гранулометрический состав. Крупный заполнитель перед нагнетанием раствора должен быть тщательно увлажнен или насыщен водой. Раствор нагнетается под давлением через трубы снизу вверх. Обычно раствор состоит из 1 части портландцемента, 1 части тонкоизмельченной высокоактивной минеральной добавки (например, золы-уноса под названием «алфесил») и 3—4 частей мелкого песка с достаточным для образования текучей смеси количеством воды.

Добавка, способствующая растеканию (интрузии) в количестве 1% веса цемента плюс пуццоланы вводятся с целью увеличения подвижности раствора и поддержания твердых составных частей во взвешенном состоянии. Добавка несколько замедляет загустевание раствора. Она содержит также небольшое количество алюминиевой пудры, вызывающей расширение раствора до схватывания.

Раствор, состоящий из цемента и мелкого песка, может также смешиваться в специальном «коллоидном» смесителе, в котором цемент настолько измельчается, что он остается в суспензии до полного завершения нагнетания. Поэтому приготовляемый в два этапа бетон также известен как коллоидный бетон.

Консистенция раствора выражается временем, необходимым для вытекания определенного количества раствора из специальной конической насадки (фактор текучести). Для этого способа необходима консистенция густого крема.

Раздельно укладываемый бетон дает экономию цемента, расход которого составляет 118—148 кг/м<sup>3</sup>, но прочность получаемого бетона ог-

раничена высоким водоцементным отношением, необходимым для достаточной пластичности раствора. Однако такая прочность обычно является достаточной, и получаемый бетон имеет более однородные свойства, чем бетон, получаемый при обычных методах укладки, так как расслоение в данном случае практически полностью устраняется. В результате получается плотный, непроницаемый, долговечный бетон.

Раздельно укладываемый бетон можно применять в местах, где неприменима обычная техника бетонирования, например в защитных экранах ядерных реакторов. Точно так же, ввиду того что крупный и мелкий заполнитель укладывают раздельно, устраняется опасность расслоения очень крупного заполнителя, особенно металлического, применяемого при защите ядерных реакторов. Вследствие отсутствия расслоения раздельно укладываемый бетон также пригоден для подводных строительных работ, где техника бетонирования несколько отличается от укладки бетона в нормальных условиях.

Усадка при высыхании в этом бетоне значительно ниже, чем в обычном, и составляет  $200 \cdot 10^{-6}$ — $400 \cdot 10^{-6}$ . Уменьшение усадки является результатом очень тесного контакта частиц крупного заполнителя, не оставляющего зазоров для цементного камня. Ввиду меньшей усадки такой бетон применяют для строительства вододерживающих сооружений, а также для ремонтных работ. Низкая проницаемость этого бетона обуславливает его высокую стойкость при замораживании и оттаивании.

Раздельно укладываемый бетон можно применять в массивных конструкциях, где необходим контроль за повышением температуры: охлаждение может достигаться циркуляцией воды вокруг заполнителя, который при этом охлаждается, а затем вода вытесняется поднимающимся раствором. В холодную погоду можно применять циркуляцию горячего пара для предварительного обогрева заполнителя.

Таким образом, раздельно укладываемый бетон имеет много преимуществ, но ввиду различных практических сложностей (например, необходимость применения чрезвычайно чистого крупного заполнителя) для достижения хороших результатов при бетонировании требуется значительные мастерство и опыт.

Достаточная удобоукладываемость бетонной смеси при минимальном водоцементном отношении может быть достигнута при вакуумной обработке свежешелюженного бетона. Такой бетон обычно называют «вакуумированным бетоном».

Процесс заключается в следующем: смесь со средней удобоукладываемостью помещают в опалубку обычным способом. Так как свежешелюженный бетон содержит непрерывную систему наполненных водой капилляров, приложение вакуума к его поверхности приводит к тому, что большое количество воды извлекается с определенной глубины бетона. Другими словами, то, что можно назвать «водой удобоукладываемости», удаляется, когда в ней нет больше потребности. Следует отметить, что пузырьки воздуха удаляются лишь с поверхности, так как они не образуют непрерывной системы.

Этим способом уменьшается окончательное водоцементное отношение, а поскольку именно это отношение в значительной степени регу-

Таблица 4.6. Водоцементное отношение и прочность вакуумированного бетона

Водоцементное отношение		Прочность на сжатие в кгс/см <sup>2</sup>	
до обработки	после обработки	до обработки	после обработки
0,74	0,68	180,7	234,1
0,71	0,59	153,2	227,1
0,65	0,57	210,2	275,6
0,6	0,55	302,3	364,6

лирует прочность, то прочность обработанного вакуумом бетона и его плотность повышаются, проницаемость уменьшается и возрастает долговечность по сравнению с бетоном, полученным обычным методом. Данные Гарнетта по прочности приведены на рис. 4.20. Сравнение следует проводить на основании начального водоцементного отношения. Величины уменьшения этого отношения в результате обработки вакуумом даны в табл. 4.6.

Вакуумирование осуществляется через пористые маты, соединенные с вакуумным насосом. Маты состоят из воздухо непроницаемого покрытия, сделанного обычно из фанеры, и вакуумной камеры из листового металла. Маты облицованы тонкой проволоочной сеткой, покрытой тонкой тканью, предотвращающей выделение цемента вместе с водой. Схематически конструкция мата показана на рис. 4.21. Маты могут быть помещены на поверхности бетона тотчас после его укладки или же могут помещаться на внутренней поверхности опалубки.

Вакуум создается с помощью вакуумного насоса; его мощность определяется периметром мата, а не его площадью. Величина разрежения обычно колеблется в пределах 38—63,5 см рт. ст. Такой вакуум снижает содержание воды на величину до 20% на глубине от 15 до 30 см. Наибольшее снижение водо-содержания происходит в поверхно-

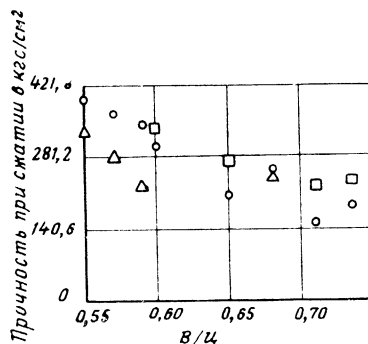


Рис. 4.20. Прочность вакуумированного и невакуумированного бетона

○ — невакуумированный бетон; △ — вакуумированный бетон к прочности при конечном В/Ц; □ — то же, к прочности при начальном В/Ц

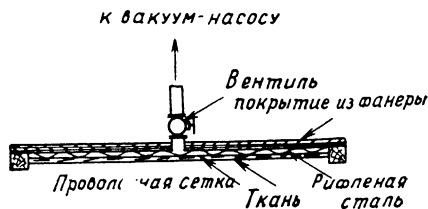


Рис. 4.21. Поперечный разрез вакуумного мата

стном слое. Обычно считают, что отсасывание полностью эффективно только на глубине до 15 см. Таким образом, бетонная конструкция толщиной до 30 см должна обрабатываться вакуумом с двух противоположных поверхностей.

Удаление воды дает осадку бетона примерно на 3% глубины, на которую действует вакуум. Скорость выделения воды уменьшается со временем. Установлено, что обработка вакуумом в течение 15—25 мин является наиболее экономичной. При обработке сверх 30 мин содержание воды уменьшается уже незначительно.

Ранее отмечалось, что при обработке вакуумом не происходит, строго говоря, отсасывания воды, а падение давления ниже атмосферного передается внутритриверной жидкости в свежееуложенном бетоне. Это означает, что происходит уплотнение атмосферным давлением. Таким образом, количество удаляемой воды должно быть эквивалентно уменьшению общего объема бетона и при этом не должно образовываться пустот. Однако на практике некоторое количество пустот все же образуется. Было установлено, что при одном и том же конечном водоцементном отношении обычный бетон имеет несколько большую прочность, чем бетон, обработанный вакуумом. Это видно из рис. 4. 20.

Образование пустот можно избежать, применяя совместно с вакуумной обработкой периодическое вибрирование: при таких условиях достигается более высокая степень уплотнения и количество выделяемой воды может быть удвоено. В опытах Гарнетта хорошие результаты были получены при обработке вакуумом в течение 20 мин в сочетании с вибрированием между 4-й и 8-й, а затем — между 14-й и 18-й минутами.

Обработка бетона вакуумом может применяться в довольно широком диапазоне отношения заполнитель: цемент и гранулометрического состава заполнителя, но более крупный заполнитель отделяет большее количество воды, чем мелкий. Кроме того, некоторые наиболее мелкие материалы удаляются при обработке, поэтому тонкомолотые добавки, такие, как пуццолан, не следует включать в состав смеси.

Бетон, обработанный вакуумом, схватывается очень быстро, так что опалубку можно удалять примерно через 30 мин даже при бетонировании колонны высотой 4,5 м. Это имеет большое экономическое значение особенно на заводах сборного бетона, так как увеличивает оборачиваемость опалубки.

Поверхность обработанного вакуумом бетона не имеет раковин, а поверхностный слой толщиной около 0,08 см является весьма износостойчивым. Такие характеристики имеют большое значение для бетонных конструкций, подвергающихся воздействию воды, текущей с большой скоростью. Другой важной характеристикой обработанного вакуумом бетона является то, что он хорошо связывается со старым бетоном и потому может применяться для перекладки покрытий дороги и других ремонтных работ. Обработка вакуумом очень полезна, но довольно дорога.



Прочность бетона обычно считается его основным свойством, хотя во многих случаях на практике другие характеристики, такие, как долговечность и непроницаемость, фактически могут быть более важными. Прочность обычно дает общую картину качества бетона, поскольку непосредственно связана со структурой затвердевшего цементного камня. Далее рассматривается влияние некоторых факторов на прочность бетона.

#### **ВОДОЦЕМЕНТНОЕ ОТНОШЕНИЕ**

В инженерной практике принимается, что прочность бетона определенного возраста, выдержанного при данной температуре, зависит прежде всего от двух факторов: водоцементного отношения и степени уплотнения. Влияние воздушных пустот на прочность рассматривалось ранее, в настоящем разделе мы рассматриваем только уплотненный бетон: на практике это значит, что твердеющий бетон содержит менее 1% воздушных пустот.

Когда бетон уплотнен полностью, его прочность обратно пропорциональна водоцементному отношению, что соответствует «закону», установленному в 1919 г. Дафом Абрамсом. Он установил зависимость прочности  $R$  от  $V/C$ :

$$R = \frac{K_1}{K_2^{V/C}},$$

где  $V/C$  — водоцементное отношение смеси (первоначально бралось по объему), а  $K_1$  и  $K_2$  — эмпирические постоянные. Типичная кривая зависимости прочности от водоцементного отношения приведена на рис. 5.1.

Установленный независимо закон Абрамса является частным случаем общего правила, сформулированного Фере в 1896 г. Оно было выражено формулой  $R = K \left( \frac{C}{C+B+a} \right)^2$ , где  $R$  — прочность бетона;  $C$ ,  $B$ ,  $a$  — соответственно абсолютные объемы цемента, воды и воздуха;  $K$  — постоянная величина.

Следует напомнить, что водоцементное отношение определяет прочность затвердевшего цементного камня на любой стадии гидратации. Водоцементное отношение и степень уплотнения влияют на объем

пустот в бетоне, и потому в формулу Фере включен объем воздуха в бетоне.

Зависимость прочности от общего объема пустот не является характерной только для бетона; она сохраняется также и у других хрупких материалов, в которых вода оставляет после себя пустоты, например прочность гипса также является прямой функцией содержания пустот.

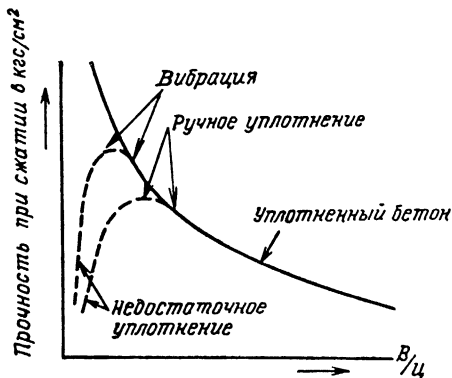


Рис. 5.1. Зависимость прочности бетона от водоцементного отношения

На рис. 5.1 показано, что диапазон действия «закона» водоцементного отношения ограничен. В нижнем конце графика кривая должна быть продолжена. Для условий, при которых полное уплотнение уже невозможно, фактическое положение начальной точки этого продолжения зависит от имеющихся средств уплотнения. Видно также, что смеси с низким водоцементным отношением и крайне высоким содержанием цемента ( $475-535 \text{ кг/м}^3$ ) показывают снижение прочности в особенности тогда, когда применяется заполнитель крупного размера.

Для смесей такого типа более низкое водоцементное отношение не приводит к более высокой прочности в позднем возрасте. Указанное состояние может возникнуть в результате напряжений, вызванных усадкой, причем сопротивление усадке частицами заполнителя вызывает растрескивание цементного камня или потерю сцепления последнего с заполнителем.

На рис. 5.2 показано, что кривая зависимости прочности от водоцементного отношения примерно имеет вид гиперболы. Геометрическим

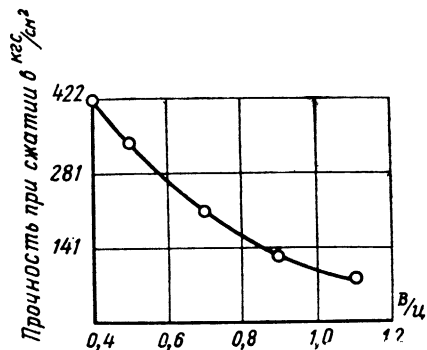


Рис. 5.2. Зависимость прочности бетона на быстротвердеющем портландцементе в 7-суточном возрасте от  $V/C$

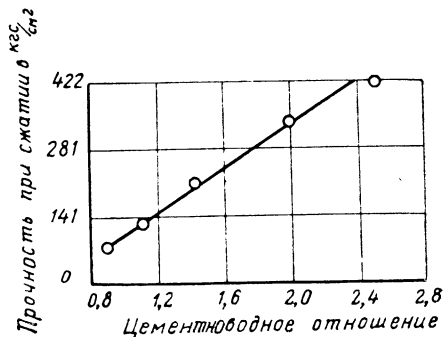


Рис. 5.3. Зависимость прочности бетона на быстротвердеющем портландцементе в 7-суточном возрасте от цементно-водного отношения

свойством гиперболы  $y = \frac{k}{x}$  является то, что она в координатах  $y$  и  $\frac{1}{x}$  выражается прямой линией. Зависимость между прочностью и цементоводным отношением в пределах цементоводных отношений от 1,2 до 2,5 является линейной. Это соотношение более удобно для применения

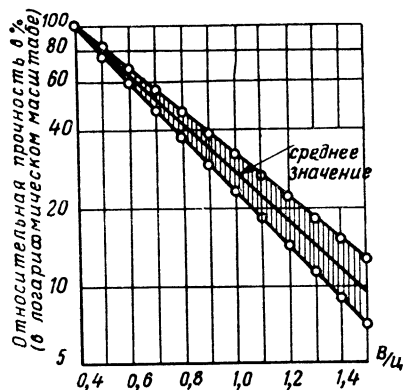


Рис. 5.4. График зависимости между прочностью (в логарифмическом масштабе) и  $V/C$

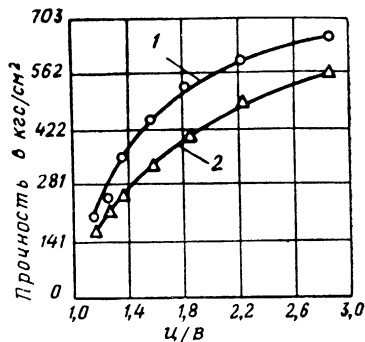


Рис. 5.5. Зависимость между прочностью при сжатии и цементоводным отношением для бетонных цилиндрических образцов, приготовленных на глиноземистом цементе  
1 — возраст образцов 14 сут.; 2 — то же, 1 сут.

по сравнению с кривой водоцементного отношения, особенно когда требуется интерполяция. На рис. 5.3, на котором использованы данные рис. 5.2, цементоводное отношение отложено по оси абсцисс. Приведенные значения применимы только к данному цементу, на практике фактическая зависимость между прочностью и цементоводным отношением должна быть определена для каждого цемента.

Следует отметить, что рассмотренные здесь зависимости не являются абсолютно точными и единственными. Например, предложено зависимость между логарифмом прочности и фактической величиной водоцементного отношения выражать линейной функцией (см. выше формулу Абрамса). В качестве примера на рис. 5.4 показана относительная прочность бетонов с различными водоцементными отношениями, при этом условно за единицу принята прочность при водоцементном отношении, равном 0,4.

Зависимость прочности от цементоводного отношения для бетонов, приготовленных на глиноземистом цементе, отличается от такой зависимости для бетонов на портландцементе (см. рис. 5.5).

### ОБЪЕМНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ ГЕЛЯ

Влияние водоцементного отношения на прочность не является истинным законом, поскольку данная зависимость не учитывает многих необходимых факторов. В частности, прочность при любом водоцементном отношении зависит от степени гидратации цемента, а также от его

химических и физических свойств, от температуры, при которой происходит гидратация, от содержания воздуха в бетоне, от колебаний в фактических значениях водоцементного отношения и от образования трещин в результате водоотделения. Поэтому более правильно связывать

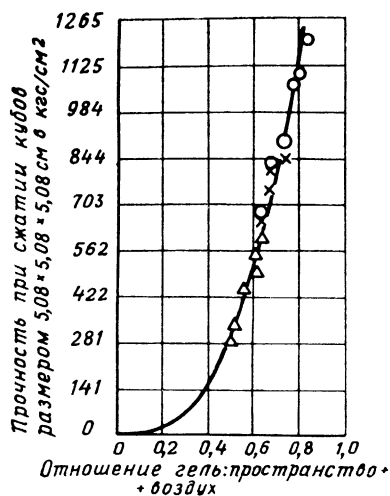


Рис. 5.6. Зависимость между прочностью раствора при сжатии и отношением гел : пространство + воздух

прочность с концентрацией твердых продуктов гидратации цемента в пространстве, доступном для этих веществ; в этой связи уместно, может быть, вернуться к рис. 1.5. Пауэрс определил зависимость между прочностью и отношением гел : пространство. Это отношение определено как отношение объема гидратированного цементного камня к объему, занимаемому суммой объемов гидратированного цемента и капиллярных пор.

Ранее было показано, что гидратированный цемент занимает объем, более чем в два раза превышающий первоначальный объем; при следующих вычислениях принимается, что продукты гидратации  $1 \text{ см}^3$  цемента займут  $2,06 \text{ см}^3$ , при этом не весь гидратированный материал является гелем. Если принять, что  $c$  — вес цемента,  $v_c$  — удельный объем цемента,  $w_0$  — объем затворения воды и  $a$  — часть цемента, прошедшая гидратацию, тогда объем геля равен  $2,06 cv_c a$ , а общее пространство, доступное для геля, равно  $cv_c a + w_0$ . Отсюда отношение гел : пространство

$$x = \frac{2,06 v_c a}{v_c a + \frac{w_0}{c}}$$

Принимая удельный объем сухого цемента равным  $0,319 \text{ см}^3/\text{г}$ , получим отношение гел : пространство, равное  $x = \frac{0,647 a}{0,319 a + \frac{w_0}{c}}$ .

Предел прочности бетона при сжатии, установленный Пауэрсом экспериментальным путем, составил  $2390 \text{ х}^3 \text{ кгс/см}^2$ , эта величина не зависит от возраста бетона и его состава. Фактическая зависимость между пределом прочности бетона при сжатии и отношением гел : пространство показана на рис. 5.6. Видно, что прочность бетона примерно пропорциональна кубу отношения гел : пространство. Значение  $2390 \text{ кгс/см}^2$  является собственно прочностью геля для данных типов цемента и испытанных образцов. Численные значения несколько отличаются для обычных портландцементов, за исключением того случая, когда более высокое содержание  $\text{С}_3\text{А}$  приводит к более низкой прочности при данном отношении гел : пространство.

Если  $A \text{ см}^3$  воздуха содержится в цементном камне, то отношение  $\frac{\omega_0}{c}$  в формуле следует заменить выражением  $\frac{\omega_0 + A}{c}$  (рис. 5.7).

Окончательная формула прочности подобна формуле Фере, но используемое в ней отношение включает величину, пропорциональную

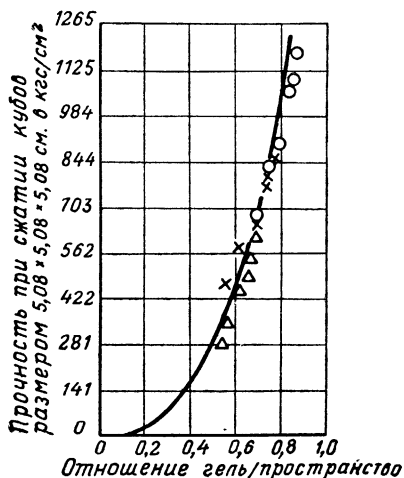


Рис. 5.7. Зависимость между прочностью раствора при сжатии и отношением гель : пространство с поправкой на воздушные пустоты

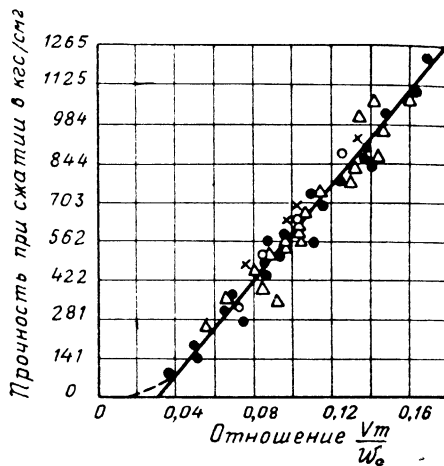


Рис. 5.8. Зависимость между прочностью цементного камня и отношением площади поверхности геля  $V_m$  к объему воды затворения  $\omega_0$

объему гидратированного цемента, вместо общего объема цемента, и таким образом она применима при любом возрасте цементного камня.

Зависимость между прочностью и отношением гель : пространство можно выразить различными способами. Можно принять, что объем неиспаряющейся воды  $\omega_n$  пропорционален объему геля, а также, что объем воды затворения связан определенным образом с пространством, доступным для геля.

Прочность  $R$  в фунтах на квадратный дюйм при значениях прочности свыше  $140 \text{ кгс/см}^2$  ( $2000 \text{ фунт/дюйм}^2$ ), когда существует линейная зависимость, может быть записана в следующем виде:

$$R = 34\,200 \frac{\omega_n}{\omega_0} - 3600.$$

При использовании площади поверхности геля  $V_m$  эта формула примет вид

$$R = 120\,000 \frac{V_m}{\omega_0} - 3600.$$

На рис. 5.8 приведены экспериментальные данные Пауэрса для цементов с низким содержанием  $C_3A$ .

Вышеприведенные формулы правильны для многих цементов, но числовые коэффициенты могут зависеть от величины прочности геля, образованного данным цементом. Другими словами, прочность цементного камня зависит прежде всего от физической структуры геля, однако нельзя пренебрегать влиянием химического состава цемента, хотя в позднем возрасте это влияние становится незначительным.

### «ЭФФЕКТИВНАЯ» ВОДА В СМЕСИ

Зависимости, рассматриваемые в данной главе, касаются количества воды в бетонной смеси. Это требует более точного определения. Мы считаем эффективной воду, которая занимает пространство за пределами зерен заполнителя, когда общий объем бетона стабилизировался, т. е. примерно в период схватывания. Отсюда и термины «эффективное» или «неэффективное» водоцементное отношение.

Обычно вода в бетоне состоит из воды затворения и из воды, содержащейся в заполнителе в момент поступления в бетономешалку. Часть последней воды адсорбирована пористой структурой заполнителя, в то время как некоторая ее часть присутствует в виде свободной воды на поверхности заполнителя и, следовательно, не отличается от воды, вводимой непосредственно в бетономешалку.

И, наоборот, когда заполнитель не насыщен водой и некоторые его поры наполнены воздухом, часть воды затворения может быть поглощена заполнителем примерно в течение первого получаса после перемешивания. В таких условиях разграничение впитанной адсорбированной и свободной воды несколько затруднено.

На строительной площадке заполнитель, как правило, является влажным и свободная вода на поверхности насыщенного водой заполнителя включается в эффективную воду бетонной смеси. По этой причине кривые прочности в зависимости от  $V/C$ , приводимые в «Дорожных записках» № 4, построены с учетом только свободной воды, вводимой с заполнителем. С другой стороны, данные Макинтоша и Энтроя относятся к общему количеству воды при использовании сухих заполнителей. Подобные условия для заполнителя чаще всего встречаются в лаборатории. Все это следует учитывать при пересчете номинального состава бетона на рабочий состав.

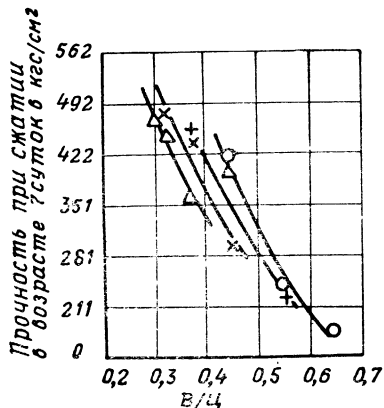


Рис. 5.9. Влияние отношения заполнитель : цемент на прочность бетона

отношение заполнитель : цемент:  
 O — 6; Δ — 5; + — 4,5; X — 3

Уже неоднократно упоминалось, что на прочность бетона первостепенное влияние оказывает его пористость. Поэтому возможно установление зависимости между пористостью бетона и действительным механизмом его разрушения. Бетон считают хрупким материалом, хотя он и проявляет некоторые пластические свойства. Разрушение бетона наступает при низком значении деформации. Предложено считать, что максимальная относительная деформация в момент разрушения 0,04—0,05 характеризует хрупкие материалы.

**ПРОЧНОСТЬ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ**

---

Фактическая прочность цементного камня или аналогичных хрупких материалов, таких, как, например, естественный камень, намного ниже теоретической прочности, установленной на основе молекулярного сцепления и вычисленной из энергии поверхности твердого вещества, предполагаемого совершенно однородным и без дефектов. Установлено, что теоретическая прочность составляет  $1,05 \times 10^5$  кгс/см<sup>2</sup>. Это несоответствие можно объяснить наличием трещин (теория Гриффитса), которые ведут к концентрации напряжений в материале под нагрузкой, так что очень высокие напряжения достигаются в очень небольших объемах образца с последующим образованием микроскопических трещин, в то время как среднее (номинальное) напряжение во всем образце остается относительно низким. Трещины различны по своим размерам, и только некоторые, самые крупные, вызывают разрушение. Прочность бетона, таким образом, является проблемой статистической вероятности, а размер образца влияет на возможное номинальное напряжение, при котором происходит разрушение.

Известно, что цементный камень содержит большое количество несплошностей — пор, трещин, пустот, однако точный механизм их влияния на прочность неизвестен. В нерасслоившемся бетоне пустоты расположены произвольно, что является необходимым условием применения гипотезы Гриффитса. Хотя мы не знаем точного механизма разрушения бетона, однако он, возможно, связан с внутренним сцеплением цементного камня и сцеплением между камнем и заполнителем.

Теория Гриффитса исходит из возникновения микроразрушений в местах разрыва материала, и обычно по ней допускается, что «единица объема», содержащая слабейшую трещину, определяет прочность всего образца. Под этим подразумевается, что любой излом распространяется по всему участку образца, подвергнутого данному напряжению, или, другими словами, то, что происходит в элементарном объеме, идентично тому, что происходит во всей массе.

Такое поведение бетона может встретиться только при условии, что бетон в месте слабейшей трещины недостаточно прочен, чтобы сопротивляться напряжению, составляющему  $\frac{n}{n-1}$  от напряжения, при котором образовалась первая трещина, где  $n$  — число элементарных

объемов в участке образца под нагрузкой (каждый элементарный объем содержит по одной трещине).

Несмотря на то что локальное разрушение начинается в точке и определяется условиями в этой точке, знание напряжения в точке тела, которая подвергалась самому высокому напряжению, недостаточно для предсказания разрушения. Необходимо знать также распределение напряжения в достаточно большом объеме вокруг данной точки, поскольку деформативность материала, особенно вблизи разрушения, зависит от состояния материала вокруг критической точки, а возможность распределения разрушения зависит от данного состояния. Этим можно объяснить, например, почему максимальные фибровые напряжения в изгибаемых образцах в момент начального разрушения выше прочности, установленной при чистом растяжении: в последнем случае распределение излома не блокируется окружающим материалом.

Можно видеть, что в данном образце различные напряжения производят разрушения в различных точках, но невозможно физически испытать прочность элементарного образца, не изменив при этом напряжения в остальных частях образца. Если прочность образца определяется его наименее прочным элементом, то решение сводится к общеизвестной задаче слабейшего звена в цепи. В статистических терминах мы должны определить наименьшую величину (т.е. сопротивление наиболее значимого дефекта) в образце размера  $n$ , где  $n$  — число дефектов в образце. Цепная аналогия может не быть абсолютно правильной, так как в бетоне звенья расположены как параллельно, так и последовательно. Однако вычисления на основе допуска слабейшего звена могут дать результаты правильного порядка. Из этого следует, что прочность такого хрупкого материала, как бетон, не может характеризоваться только средней величиной: должны быть указаны возможные вариации прочности так же, как данные о величине и форме образцов. Эти факторы рассматриваются в гл. 8.

### **ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ПРИ СЖАТИИ**

---

Гипотеза Гриффитса применима для разрушения под действием растягивающих сил, но ее можно распространить на разрушение при двух- и трехосном напряженном состоянии, а также при внецентренном сжатии. Даже когда два главных напряжения являются сжимающими, напряжения по краям трещины представляют собой растяжение в некоторых точках, что может привести к разрушению.

Орован вычислил, что максимальное растягивающее напряжение на конце трещины при самой опасной ориентировке относится к основному напряжению оси координат как функции двух основных напряжений  $P$  и  $Q$ . Критерий излома графически представлен на рис. 5.10, где  $K$  — прочность при осевом растяжении. Разрушение возникает при таком сочетании  $P$  и  $Q$ , когда точка, характеризующая напряженное состояние, находится за пределами области ограниченной кривой.



На рис. 5.10 видно, что излом может возникнуть, когда применяется внецентренное сжатие; фактически это наблюдалось при испытании бетонных образцов на сжатие. Номинальная прочность при сжатии в данном случае равна  $8K$ , т. е. прочность, превышающая в восемь раз прочность при растяжении, установленную при испытании на чистое растяжение. Данная цифра согласуется с наблюдаемыми величинами соотношения между прочностью при сжатии и прочностью при растяжении. Существует, однако, ряд трудностей при согласовании некоторых аспектов теории Гриффитса с наблюдаемым направлением трещин в образцах, подвергнутых сжатию. Хотя возможно, что разрушение в таком образце определяется поперечной деформацией, определенной с помощью коэффициента Пуассона. Порядок значений коэффициента Пуассона для бетона таков, что для элементарных объемов, достаточно удаленных от плит испытательной машины, конечная поперечная деформация может превысить предельную растяжимость бетона. Разрушение возникает благодаря раскалыванию под прямыми углами по отношению к направлению нагрузки, что довольно часто наблюдается, особенно в образцах, у которых высота больше ширины.

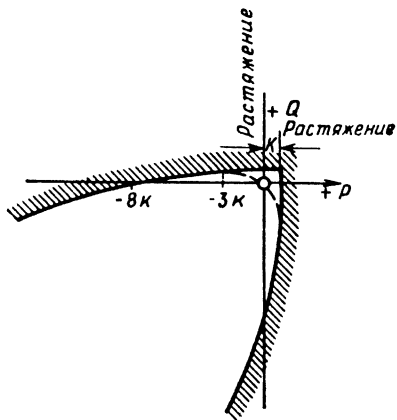


Рис. 5.10. Критерий Орована для разрушения под действием двухосевых напряжений

Существуют четкие доказательства, что прочность бетона определяет не предельное напряжение, а предельную деформацию при растяжении. Полагают, что она находится в пределах между  $10^{-4}$  и  $2 \times 10^{-4}$ . Установлено, что в точке первоначального образования трещины деформации на растянутой грани балки при изгибе и поперечная деформация в цилиндре при одноосном сжатии имеют одинаковые величины. Деформация растяжения в балке при возникновении трещин равна:

$$\frac{\text{растягивающие напряжения при изгибе в момент трещинообразования}}{E},$$

где  $E$  — модуль упругости бетона, определенный в нелинейном диапазоне деформации.

Поперечная деформация в образце при сжатии в момент первоначального обнаружения трещин равна:

$$\frac{\mu \times \text{сжимающие напряжения при трещинообразовании}}{E},$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Из приведенных выше уравнений получим

$$\mu = \frac{\text{растягивающие напряжения при изгибе в момент трещинообразования}}{\text{сжимающие напряжения при трещинообразовании}}$$

Коэффициент Пуассона колеблется приблизительно между 0,11 для бетона с высокой прочностью и 0,21 для малопрочных бетонов. Показательно, что соотношение между нормальными прочностями на растяжение и сжатие для различных бетонов изменяется подобным образом и примерно в тех же пределах. Таким образом, существует возможность связи между отношением номинальных прочностей и коэффициентом Пуассона. Есть основание предполагать, что механизм, вызывающий возникновение первоначальных трещин при одноосном сжатии и растяжении при изгибе, тот же самый. Природа этого механизма не установлена, но трещинообразование происходит, вероятно, в результате местных нарушений сцепления между цементным камнем и заполнителем.

Конечное разрушение под действием внецентренного сжатия является разрушением либо кристаллов цементного камня при растяжении, либо нарушением сцепления в направлении, перпендикулярном приложенной нагрузке, либо разрушением, вызванным развитием скалывания по наклонным площадкам. Возможно, что предельная деформация является критерием разрушения, но уровень деформации изменяется в зависимости от прочности бетона: чем выше прочность, тем ниже предельная деформация. Некоторые типичные значения приводятся ниже.

Номинальная прочность при сжатии в $\text{кгс/см}^2$	Максимальная деформация при разрушении $\times 10^{-3}$
70	4,5
140	4
351	3
703	2

При трехосном сжатии разрушение должно произойти в результате раздробления; механизм разрушения, следовательно, совершенно отличен от описанного выше. Увеличение поперечного обжатия повышает прочность при осевом нагружении, что подтверждается данными рис. 5.11. При очень высокой степени поперечного обжатия были достигнуты крайне высокие прочности (рис. 5.12).

Поперечное растягивающее напряжение влияет аналогично но, разумеется, в обратном направлении. Это положение хорошо согласуется с теоретическими расчетами.

На практике, по-видимому, разрушение бетона наступает при напряжениях, несколько больших, чем те, которые вызывают появление микротрещин, так что конечное разрушение является функцией типа

нагрузки<sup>1</sup>. Это представляет интерес при повторной нагрузке — условие, часто встречающееся в практике.

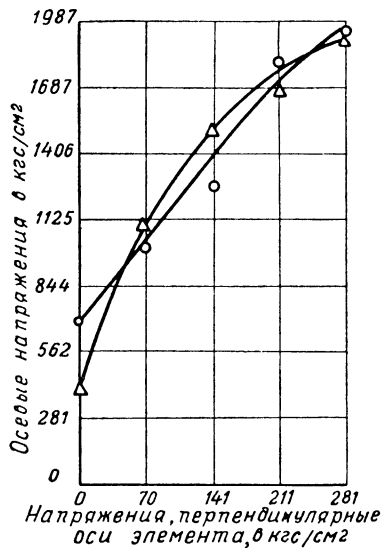


Рис. 5.11. Влияние поперечных напряжений на осевые напряжения при разрушении цементного камня и раствора

○ — цементный камень;  $V/C=0,35$ ; △ — раствор,  $V/C=0,4$

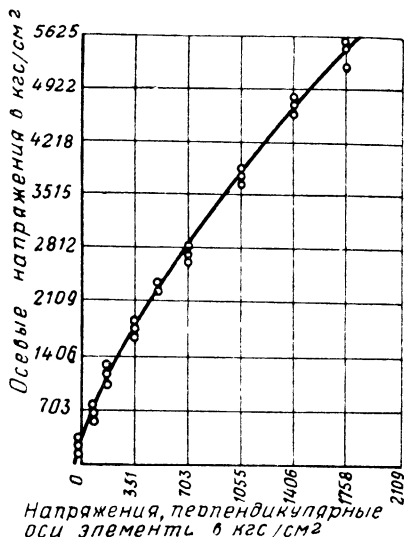


Рис. 5.12. Влияние высоких поперечных напряжений на осевые напряжения при разрушении бетона

<sup>1</sup> В работах О. Я. Берга [40, 41] показано, что процесс трещинообразования и последующего разрушения бетона под нагрузкой начинается задолго до достижения его предела прочности при сжатии. (Прим. ред.)

О. Я. Бергом введено понятие «дифференциального коэффициента» поперечной деформации, который вычисляется из условия:

$$\Delta V = \frac{\Delta \varepsilon_2}{\Delta \varepsilon_1},$$

где  $\Delta \varepsilon_1$  и  $\Delta \varepsilon_2$  — приращения продольной и поперечной деформации данной ступени приращения нагрузки  $\Delta \sigma$  соответственно.

По коэффициенту  $\Delta V$  устанавливают характерные точки напряженного состояния —  $R_T^0$  и  $R_T^V$ .

После достижения границы микроразрушений  $R_T^0$  дифференциальный коэффициент начинает увеличиваться, а приращение объема образца уменьшаться. При напряжениях выше этой границы наступает нелинейная ползучесть, развиваются пластические деформации на кромке сжатой зоны изгибаемых или внецентренно сжатых элементов, а также происходит разрушение образца при многократно повторяющейся нагрузке.

Выше границы  $R_T^V$  наблюдается существенное нарушение структуры бетона; остаточные деформации являются псевдопластическими.

Исследованиями Г. Н. Писанко [42, 43], путем статистической обработки большого количества экспериментальных данных, подтверждена зависимость Фере  $\sigma_\tau = 0,5 \sigma_c^{2/3}$ ,

где  $\sigma_\tau$  — предел прочности при осевом растяжении;  $\sigma_c$  — то же, при сжатии. (Прим. ред.)

Известно, что динамическая прочность бетона должна быть ниже статической прочности, что объясняется образованием и прогрессирующим развитием трещин. Бесконечное число повторений может быть выдержано только в том случае, если максимальное напряжение не превышает 50% статической предельной прочности. Это применимо к сжатию и изгибу. Число циклов, которое может выдержать бетон, быстро уменьшается с увеличением максимального напряжения: например, при напряжении, равном 70% номинального предела, приблизительно в 5000 циклах происходит разрушение.

### **ВЛИЯНИЕ КРУПНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ПРОЧНОСТЬ**

Вертикальное растрескивание в образце под действием одноосного сжатия начинается при нагрузке 50—75% предельной. Это было установлено по измерениям скорости звука в бетоне, а также в результате применения импульсного ультразвукового метода. Напряжение, при котором образуются трещины, зависит прежде всего от свойств крупного заполнителя: применение гравия с гладкой поверхностью ведет к появлению трещин при более низких напряжениях по сравнению с бетоном на щебне. Вероятно, это связано с тем, что механическое сцепление зависит от свойств поверхности и до некоторой степени от формы зерен крупного заполнителя.

Свойства заполнителя влияют на напряжение, при котором начинается образование трещин при сжатии в той же степени, как и на предел прочности при изгибе, так что отношение между этими двумя величинами не зависит от свойств заполнителя. На рис. 5.13 приведены результаты исследований Джонса и Каплана, каждый условный знак на рисунке обозначает различный вид крупного заполнителя. С другой стороны, отношение между пределом прочности при изгибе и пределом прочности при сжатии зависит от вида используемого заполнителя (рис. 5.14), так что, за исключением высокопрочного бетона, свойства заполнителя, особенно структура его поверхности, воздействуют на предел прочности при сжатии намного меньше, чем на предел прочности при растяжении или трещинообразующее напряжение при сжатии.

Влияние вида крупного заполнителя на прочность бетона зависит от водоцементного отношения. Для  $V/C$  ниже 0,4 применение щебня привело к получению прочности на 38% выше, чем при применении гравия. С повышением  $V/C$  влияние вида заполнителя на прочность сводится на нет, потому что прочность цементного камня, по-видимому, становится определяющей, и при  $V/C$ , равном 0,65, не наблюдалось различий в прочности бетонов, изготовленных на гравии или щебне.

Влияние вида заполнителя на прочность при изгибе, вероятно, зависит и от влажности бетона во время испытаний.

Форма и структура поверхности крупного заполнителя влияет также на сопротивление бетона удару, причем характер влияния такой же, как и на сопротивление изгибу.

Каплан наблюдал, что прочность бетона на изгиб в основном ниже прочности на изгиб соответствующего цементного раствора. Таким образом, цементный раствор, входящий в состав бетона, определяет его верхний предел прочности при изгибе, присутствие же крупного за-

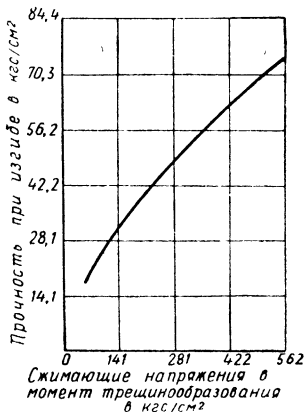


Рис. 5.13. Зависимость между прочностью при изгибе и напряжениями в момент трещинообразования для бетонов, приготовленных на различном крупном заполнителе

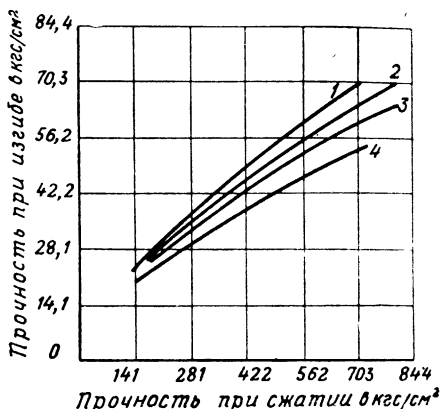


Рис. 5.14. Зависимость между прочностью при изгибе и сжатии для бетонов, приготовленных на различных заполнителях 1—4

полнителя снижает эту прочность. С другой стороны, прочность бетона на сжатие выше прочности цементного раствора; следовательно, согласно Каплану, механическое сцепление крупного заполнителя увеличивает прочность бетона на сжатие. Изложенные выше положения не получили достаточного подтверждения, и проблема прочности цемента и бетона требует дальнейшего изучения.

### **ВЛИЯНИЕ ЖИРНОСТИ СМЕСИ НА ПРОЧНОСТЬ**

Аномалии в поведении крайне жирных смесей рассмотрены ранее, но величина отношения заполнитель : цемент влияет на прочность всех бетонов средней и высокой прочности, т. е. бетонов с прочностью около  $350 \text{ кгс/см}^2$  и выше. Несомненно, что соотношение между заполнителем и цементом является лишь второстепенным фактором для прочности бетона, однако установлено, что при постоянном  $V/C$  более тощие смеси имеют более высокие прочности.

Это, возможно, связано с поглощением воды заполнителем: большее количество заполнителя поглощает большее количество воды, и эф-

фективное водоцементное отношение, таким образом, уменьшается. Однако возможно, что другие факторы также играют определенную роль: например, общее содержание воды в  $1 \text{ м}^3$  бетона ниже в тощей смеси, чем в жирной. В результате в более тощей смеси пустоты занимают меньше места в общей массе бетона, а пустоты, как известно, неблагоприятно влияют на прочность; следует отметить, что тощим бетоном считаются смеси с высоким значением отношения заполнитель : цемент, но обычно не выше 10.

### **ВЛИЯНИЕ ВОЗРАСТА НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА**

Зависимость между  $B/C$  и прочностью бетона действительна только для одного вида цемента и в одном возрасте. Зависимость прочности от отношения геля : пространство является более общей, поскольку количество геля в цементном тесте в любое время само по себе зависит от возраста и вида цемента. Другими словами, различные цементы требуют различной продолжительности во времени для получения такого же количества геля.

Интенсивность роста прочности различных цементов рассматривалась в гл. 2, а на рис. 2.1 и 2.2 показаны типичные кривые зависимости прочности от времени. Влияние условий выдерживания бетона на прочность будет рассмотрено в данной главе ниже, но здесь мы сталкиваемся с практической проблемой прочности бетона, который испытывается в различном возрасте. В большинстве случаев испытания проводятся в возрасте 28 суток, когда прочность бетона значительно ниже его прочности в более позднем возрасте. Ранее рост прочности после 28 суток рассматривался лишь как фактор, увеличивающий запас прочности, но в 1957 г. в Строительных правилах для железобетона (СР 114) было предусмотрено, что при проектировании состава бетона следует учитывать рост прочности бетона при отсутствии нагрузки до определенного возраста. Строительные правила СР 114 определяют допускаемые напряжения в различные сроки, причем за единицу принят предел прочности при сжатии в 28-суточном возрасте. Разумеется, указанные данные не применимы при использовании ускорителей твердения.

Максимальный возраст элемента в месяцах при применении полной заданной нагрузки	Коэффициент, учитывающий влияние возраста бетона
1	1
2	1,1
3	1,16
6	1,2
12	1,24

Часто требуется проверить пригодность бетонной смеси задолго до того, как будут известны результаты испытания бетона в возрасте

28 суток. Однако, даже если условия выдерживания тщательно соблюдались, предварительное вычисление прочности 28-суточного бетона на основе прочности, измеренной в возрасте 7 суток, затруднено, главным образом, из-за вариаций в степени роста прочности цементов.

Когда отсутствуют более точные данные по применяемым материалам, можно принять 28-суточную прочность в 1,5 раза больше 7-суточной. Строительные правила СР 114 (1957) допускают 7-суточную прочность, равную не менее чем  $\frac{2}{3}$  требуемой 28-суточной. Опыты показали, что для бетонов, приготовленных на обычном портландцементе, отношение 28-суточной прочности к 7-суточной обычно находится в пределах 1,3—1,7, в большинстве случаев 1,5. Экстраполяция 7-суточной прочности по Строительным правилам совершенно надежна. Однако в жарком климате ранний рост прочности выше и отношение 28-суточной прочности к 7-суточной имеет тенденцию быть ниже, чем при холодном климате.

Хюммель рекомендует использовать примерно линейное отношение между прочностью и логарифмом возраста в пределах от 3 суток до двух месяцев. Таким образом, если определена прочность через 3 и 7 суток, то путем экстраполяции можно вычислить 28-суточную прочность.

Все упомянутое здесь применимо только для бетона, изготовленного из обычного портландцемента. Другие цементы наращивают прочность в различной степени, и при их применении предварительное установление прочности должно быть основано на экспериментальных результатах.

### **САМОЗАЛЕЧИВАНИЕ ТРЕЩИН**

Мелкие трещины в бетоне, если предположить, что их удастся закрыть без тангенциального смещения, могут полностью залечиваться при влажных условиях. Подобное самозалечивание трещин, возможно, происходит благодаря гидратации прежде негидратированного цемента и, возможно, также в результате карбонизации. Чем более раннего возраста бетон, т. е. чем больше в нем содержится негидратированного цемента, тем выше вторичный рост прочности, но восстановление без потери прочности наблюдается и в возрасте бетона до трех лет. Приложение давления, перпендикулярного к трещине, помогает самозалечиванию.

### **ОТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ПРОЧНОСТЬЮ ПРИ СЖАТИИ И ПРОЧНОСТЬЮ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ**

Из рассмотрения прочности опытных образцов на сжатие и растяжение (как осевое, так и при изгибе) можно сделать вывод, что эти два типа прочности взаимно связаны. Однако величина соотношения двух видов прочности зависит от общего уровня прочности бетона. Другими словами, с увеличением прочности на сжатие  $\sigma_c$  увеличивается также и прочность на растяжение  $\sigma_t$ , но в меньшей степени.

На отношение между двумя прочностями влияет ряд факторов. Повышение прочности при изгибе при использовании щебня рассматривалось ранее, но, по-видимому, свойства мелкого заполнителя влияют и на отношение  $\frac{\sigma_t}{\sigma_c}$ . Отношение также зависит от зернового состава заполнителя.

Возраст бетона также является фактором, влияющим на отношение между  $\sigma_t$  и  $\sigma_c$ ; после примерно одного месяца прочность на растяжение увеличивается значительно медленнее, чем прочность на сжа-

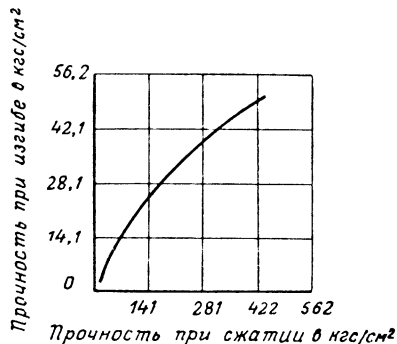


Рис. 5.15. Зависимость между прочностью при изгибе и сжатии для полностью уплотненных бетонов

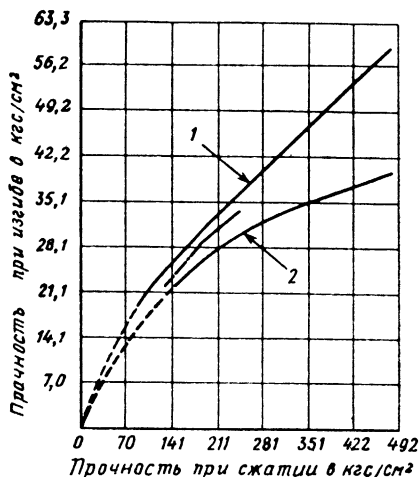


Рис. 5.16. Зависимость между прочностью при изгибе и сжатии для бетона с воздухововлечением (2) и без воздухововлечения (1)

тие, так что отношение  $\frac{\sigma_t}{\sigma_c}$  уменьшается со временем. Это согласуется с основной тенденцией уменьшения этого отношения при увеличении  $\sigma_c$ .

Прочность на растяжение в большей степени зависит от режима твердения, чем прочность на сжатие, возможно, потому, что неравномерная усадка балок при испытании на изгиб оказывает значительное влияние на прочность. Бетон, твердевший на воздухе, имеет более низкое отношение  $\frac{\sigma_t}{\sigma_c}$  по сравнению с бетоном, твердевшим в воде.

Воздухововлекающая добавка влияет на отношение  $\frac{\sigma_t}{\sigma_c}$ , поскольку присутствие воздуха понижает прочность бетона на сжатие больше, чем на растяжение, особенно при жирных смесях. Влияние неполного уплотнения такое же, как и вовлеченного воздуха (рис. 5.15).

Легкий бетон подчиняется закономерностям отношения между  $\sigma_t$  и  $\sigma_c$  так же, как и тяжелый бетон. При очень низкой прочности, например 21 кгс/см², отношение  $\frac{\sigma_t}{\sigma_c}$  может достигнуть 0,3, но при более вы-



сокой прочности оно уменьшается до значений, которые можно сравнить с величинами для обычного бетона. В последнем случае отношение обычно колеблется между 0,07—0,16. Прочность бетона на растяжение зависит от типа и метода испытания, так что способ определения  $\sigma_t$  должен быть точно установлен.

Был предложен ряд эмпирических формул, связывающих  $\sigma_t$  и  $\sigma_c$ , многие из них имеют вид  $\sigma_t = K(\sigma_c)^n$ , где  $K$  и  $n$  — коэффициенты. Опыты, проведенные в Строительном научно-исследовательском центре на кубиках размером  $10,16 \times 10,16 \times 10,16$  мм и балках размером  $10,16 \times 10,16 \times 40,64$  см, которые подвергались нагрузке в середине балки, дали значения для  $n=0,5$  и  $K=8,3$ . Последнее значение фактически колебалось между 6,2 для гравия и 10,4 для щебня. Другие эксперименты показали, что величина  $n$  может колебаться между  $1/2$  и  $3/4$ .

Европейский комитет по бетону определил, что прочность при растяжении связана с прочностью при сжатии цилиндров зависимостью  $\sigma_t = 9,5 (\sigma_c)^{1/2}$ , где прочность выражена в фунтах на квадратный дюйм.

Другая формула была предложена университетом в Иллинойсе  $\sigma_t = \frac{3000}{4 + \frac{12000}{\sigma_c}}$ , где  $\sigma_t$  — прочность при растяжении, а  $\sigma_c$  определяется

на опытных стандартных цилиндрах.

Ввиду многочисленности факторов, влияющих на отношение прочностей, неудивительно, что простое отношение совершенно неприемлемо. Данные, полученные в лабораториях портландцементной ассоциации, приведены в табл. 5.1, а на рис. 5.16 показаны результаты опытов Уолкера и Блоэма.

Таблица 5.1. Отношение между прочностью бетона при сжатии и прочностью при растяжении

Предел прочности при сжатии цилиндров в кгс/см <sup>2</sup>	Отношение		
	прочности при изгибе к прочности при сжатии <sup>1</sup>	прочности при осевом растяжении к прочности при сжатии	прочности при осевом растяжении к прочности при изгибе <sup>1</sup>
70	0,23	0,11	0,48
141	0,19	0,1	0,53
211	0,16	0,09	0,57
281	0,15	0,09	0,59
351	0,14	0,08	0,59
422	0,13	0,08	0,6
492	0,12	0,07	0,61
562	0,12	0,07	0,62
632	0,11	0,07	0,63

<sup>1</sup> Прочность при изгибе определена при нагружении балки тремя сосредоточенными силами.

## СЦЕПЛЕНИЕ МЕЖДУ БЕТОНОМ И АРМАТУРОЙ

Поскольку бетон во многих случаях применяют со стальной арматурой, то значительный интерес представляет прочность сцепления между этими двумя материалами. Сцепление возникает главным образом в результате трения и сцепления между бетоном и сталью, а также под действием усадки бетона. Сцепление, однако, зависит не только от свойств бетона, но также от механических свойств стали и ее положения в бетоне. Рассмотрение влияния этих факторов на сцепление выходит за рамки данной книги.

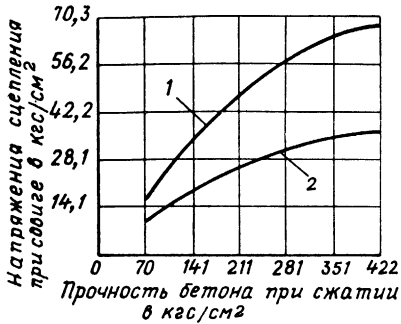


Рис. 5.17. Влияние прочности бетона на его сцепление, определенное «методом выдергивания»

1 — стержни переменного профиля; 2 — круглые стержни

В основном сцепление зависит от прочности бетона, сила сцепления примерно пропорциональна прочности бетона при сжатии и составляет около 210 кгс/см<sup>2</sup>. Для бетона повышенной прочности повышение сцепления постепенно замедляется, и в конечном счете это увеличение становится несущественным (рис. 5.17). Вот почему большинство строительных правил ограничивает допустимую величину сцепления в высокопрочном бетоне.

Правила Американского института бетона 318—56 предусматривают расчет силы сцепления в зависимости от прочности бетона на сжатие вплоть до прочности 45 кгс/см<sup>2</sup>, в бетонах более высокой прочности увеличение силы сцепления не учитывается.

## ТВЕРДЕНИЕ БЕТОНА

Для получения хорошего качества бетона укладка смеси должна сопровождаться уходом — созданием соответствующих условий на ранних стадиях твердения. Под уходом понимаются режимы, способствующие гидратации цемента, включающие контроль за температурой и влагообменом.

Более того, цель ухода заключается в сохранении насыщенности бетона влагой настолько это возможно, пока пространства, первоначально наполненные водой в свежееуложенной смеси, не будут заполнены требуемым количеством продуктов гидратации цемента. В том случае, если бетонная смесь приготовлена на строительной площадке, активный уход прекращается почти всегда до того, как произойдет максимально возможная гидратация. Влияние влажного выдерживания на прочность можно установить по рис. 5.18 на примере бетона с  $B/C$ , равным 0,5.

Необходимость выдерживания обуславливается тем, что гидратация цемента может происходить только в капиллярах, заполненных водой. Поэтому потеря воды в результате испарения в капиллярах должна быть предотвращена. Более того, вода, потерянная в результате самоусыхания, должна быть заменена водой извне, т.е. должно быть обеспечено проникание воды в бетон.

Следует отметить, что гидратация образцов, покрытых изолирующей пленкой, может продолжаться только в том случае, если количество воды, находящееся в цементном тесте, по крайней мере в два раза превышает количество уже связанной воды. Таким образом, самоусыхание весьма существенно в смесях, в которых  $V/C$  ниже 0,5; для более высоких  $V/C$  условия твердения образца, покрытого пленкой, такие же, как и образца, насыщенного водой. Не следует, однако, забывать, что химически связана может быть только половина содержащейся в тесте воды, даже если общее количество содержащейся в тесте воды меньше количества воды, требуемого для полной гидратации. Это положение крайне важно, поскольку раньше думали, что при применении бетонной смеси, содержащей больше воды, чем требуется для химической реакции, небольшая потеря воды в период твердения не будет неблагоприятно влиять на процесс твердения и рост прочности.

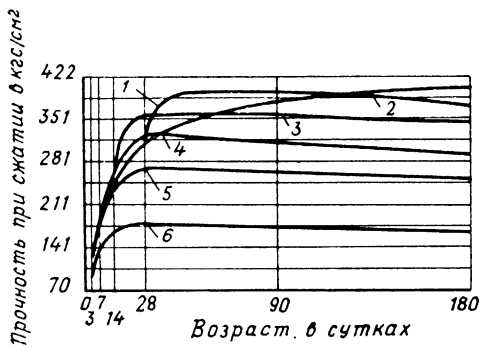


Рис. 5.18. Влияние влажностных условий твердения на прочность бетона с  $V/C=0,5$  твердение на воздухе: 1 — после 28 сут.; 6 — постоянно; твердение во влажной среде; 2 — постоянно; 3 — после 14 сут.; 4 — после 7 сут.; 5 — после 3 сут.

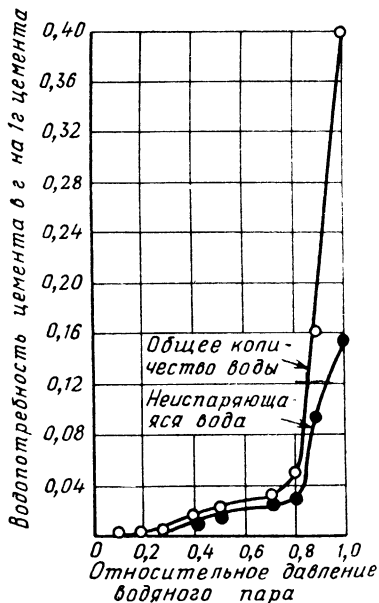


Рис. 5.19. Степень гидратации цемента после 6-месячного хранения при различной относительной влажности

Теперь известно, что гидратация возможна только тогда, когда давление пара в капиллярах достаточно высокое и составляет около 0,8 от давления насыщенного пара. Гидратация в максимальной степени может происходить только в условиях насыщения. На рис. 5.19 показана

степень гидратации после шестимесячного твердения при различной относительной влажности; ясно, что при давлении пара ниже 0,8 от давления насыщения степень гидратации низкая, ее можно не принимать во внимание при давлении ниже 0,3 от давления насыщения.

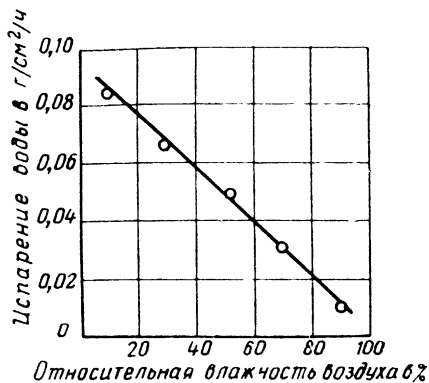


Рис. 5.20. Влияние относительной влажности воздуха на испарение воды из бетона (температура воздуха 21,1° С, скорость ветра 16 км/ч)

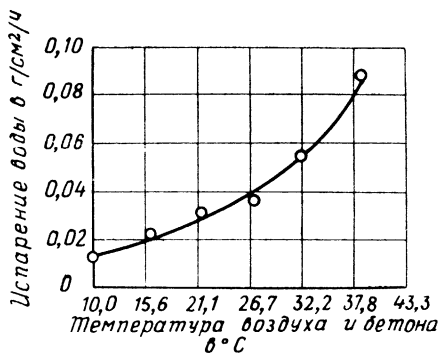


Рис. 5.21. Влияние температуры воздуха и бетона на испарение воды из бетона (относительная влажность воздуха 70%, скорость ветра 16 км/ч)

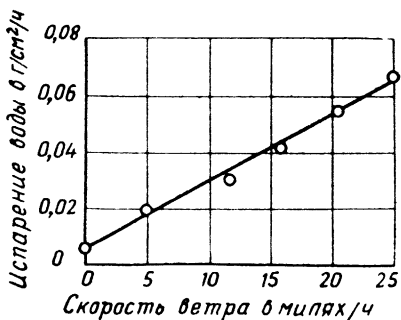


Рис. 5.22. Влияние скорости ветра на испарение воды из бетона (относительная влажность воздуха 70%, температура 21,1° С)

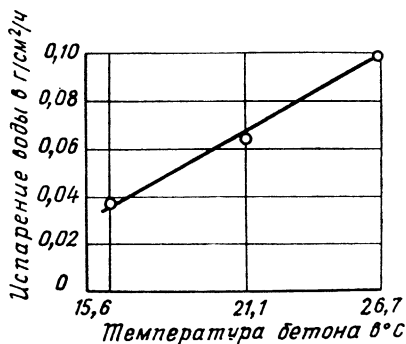


Рис. 5.23. Влияние температуры бетона (при температуре воздуха 4,4° С) на испарение воды из бетона (относительная влажность воздуха 100%, скорость ветра 16 км/ч)

Следует подчеркнуть, что для получения достаточной прочности совсем не обязательно, чтобы гидратировался весь цемент, что действительно очень редко достигается на практике. Как показано выше, качество бетона зависит прежде всего от отношения геля:пространство в цементном камне. Однако если пространство, заполненное в свежеприготовленной смеси водой, больше объема, который можно запол-

нить продуктами гидратации, то более полная гидратация приведет к получению более высокой прочности и более низкой проницаемости.

Испарение воды из бетона зависит от температуры и относительной влажности окружающего воздуха, а также от скорости ветра, который влияет на движение воздуха вблизи поверхности бетона. Влияние этих трех факторов ясно из рассмотрения графиков на рис. 5.20, 5.21 и 5.22, основанных на результатах исследований Лерча. Разница в температурах бетона и воздуха также воздействует на потерю воды, как показано на рис. 5.23. Таким образом, бетон, насыщенный днем, теряет воду холодной ночью; это происходит и с литым бетоном в холодную погоду даже при влажном воздухе. Приведенные примеры условны, поскольку фактическая потеря воды зависит от отношения поверхности образца к его объему.

### МЕТОДЫ УХОДА ЗА БЕТОНОМ

Здесь будет дано краткое описание различных способов ухода, так как существует множество практических режимов, зависящих от условий на площадке, размеров, формы и положения деталей.

В том случае, когда выдерживаются детали с небольшим соотношением поверхности и объема, перед укладкой бетона можно формы смазать маслом и увлажнить; формы можно также увлажнять во время твердения, а после распалубки бетон должен быть увлажнен распылением воды и закрыт полиэтиленовыми листами или другими материалами.

Бетонирование элементов с большой поверхностью бетона, таких, как дорожные плиты, представляет более серьезную проблему. Для предотвращения образования волосных трещин на поверхности при высыхании следует предотвратить потерю воды даже до схватывания. Поскольку бетон в данное время малопрочен, необходимо покрыть поверхность бетона. Эта защита требуется только в сухую погоду, но может быть также полезна для предохранения поверхности свежего бетона от дождя.

Когда бетон схватился, влажное выдерживание обеспечивается контактом бетона непосредственно с водой. Это может быть достигнуто распылением или поливкой, а также покрытием бетона мокрым песком или землей либо древесными опилками или соломой. Можно изменять периодически увлажняемые хлопковые маты или маты из пеньки и джута, пропитанные битуминозным составом, или на поверхность бетона можно нанести абсорбирующее покрытие, поглощающее воду. Постоянный контакт с водой, естественно, более эффективен, чем прерывистый. На рис. 5.24 сравнивается прочность бетонных цилиндров, верхняя поверхность которых орошалась в течение первых 24 ч, с прочностью цилиндров, покрытых мокрыми матами из пеньки и джута. Различие более значительно при низких  $V/C$ , где быстро происходит усыхание. Влияние условий выдерживания на прочность ниже в бетоне с воздухоовлечением, чем без воздухоовлечения.

Другие методы ухода заключаются в применении герметических пленок или водонепроницаемой бумаги. Пленка, если только она не пробита и не повреждена, эффективно предохранит бетон от испарения

воды, но не допустит проникания воды для пополнения потери последней в результате самоусыхания. Пленки изготовляют из изоляционных материалов, которые могут быть прозрачными, белыми либо черными. Непрозрачные материалы затемяют бетон, а светлый тон ведет к пониженному поглощению тепла от солнечной радиации, а следовательно, и к менее интенсивному повышению температуры бетона. Подробности о выдерживании бетона выйдут за пределы данной книги. Эффективные методы выдерживания бетона рекомендуются стандартом ASTM C 156—55T1.

Изоляционные материалы, если только их не применяют для бетона с высоким  $V/C$ , понижают степень и скорость гидратации по сравнению с эффективным влажным выдерживанием. Однако влажное выдерживание часто применяют только периодически, так что на практике изоляция может привести к лучшим результатам.

Продолжительность ухода нельзя установить однозначно, но, как правило, она составляет минимум 7 суток для бетона на обычном портландцементе. Для медленно твердеющих цементов желателен более длительный период ухода. За высокопрочным бетоном требуется особый уход в раннем возрасте, поскольку частичная гидратация может сделать капилляры прерывистыми и при этом не будет происходить дальнейшая гидратация. Смеси с высоким  $V/C$  всегда сохраняют большой объем капилляров, так что уход может быть возобновлен в любое время. В результате временного прекращения ухода потери прочности

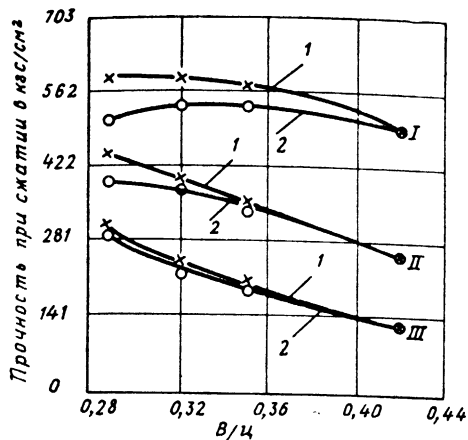


Рис. 5.24. Влияние условий твердения на прочность цилиндрических образцов  
возраст бетона: I—28 сут.; II—3 сут.; III—1 сут.

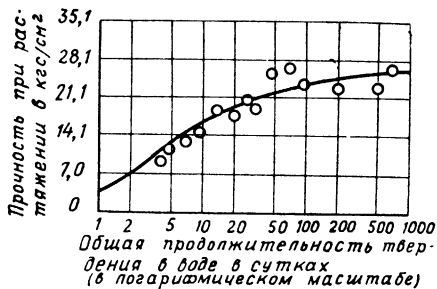


Рис. 5.25. Зависимость между общим временем твердения в воде и прочностью раствора при растяжении (сплошная линия относится к образцам, постоянно твердевшим в воде; точки означают образцы, твердевшие 3 суток в воде, затем 28 суток на сухом воздухе и остальное время в воде)  
1 — орошение; 2 — влажное покрытие

вода не сможет войти внутрь бетона, при этом не будет происходить дальнейшая гидратация. Смеси с высоким  $V/C$  всегда сохраняют большой объем капилляров, так что уход может быть возобновлен в любое время. В результате временного прекращения ухода потери прочности

не наблюдается, как показано, например, на рис. 5.25 для цементного раствора состава 1:3,4 с  $B/C$ , равным 0,7, но на практике раннее высыхание может привести к усадке и растрескиванию, так что перерывы в уходе нежелательны.

### «ЗРЕЛОСТЬ» БЕТОНА

До сих пор мы рассматривали только проблему продолжительности ухода, но, как указывалось ранее, температура в период ухода также влияет на скорость реакции гидратации и соответственно влияет на развитие прочности бетона. Это влияние показано на рис. 5.26, данные которого получены из опытов на образцах, изготовленных, изолированных и выдержанных при разных температурах.

Так как прочность бетона зависит как от возраста, так и от температуры, мы можем сказать, что прочность является функцией от  $\Sigma$  (время  $\times$  температура). По экспериментальным данным бетон имеет начальную температуру  $13^\circ\text{C}$ ; это объясняется тем, что при температурах от точки заморзания воды до  $-11^\circ$  бетон показывает наибольшее увеличение прочности с течением времени, но, разумеется, недопустимо действие низкой температуры, пока не произойдет схватывание бетона и прочность не достигнет достаточной величины, чтобы противостоять разрушениям под действием мороза<sup>1</sup>. Обычно требуется «выжидательный период» — 24 ч.

Зрелость измеряется в градусо-часах или градусо-сутках. На рис. 5.27 показано, что зависимость прочности от зрелости бетона имеет прямолинейный характер. Следовательно, можно выразить прочность при любой зрелости как процентное содержание прочности бетона от любой другой зрелости. Последняя обычно берется за  $35\,600^\circ\text{F}\cdot\text{ч}$ ; это зрелость бетона, твердевшего при  $17,8^\circ\text{C}$  в течение 28 суток. Отношение прочностей, выраженное в процентах, можно затем записать как  $A + B \lg_{10}$  (зрелость  $\times 10^{-3}$ ).

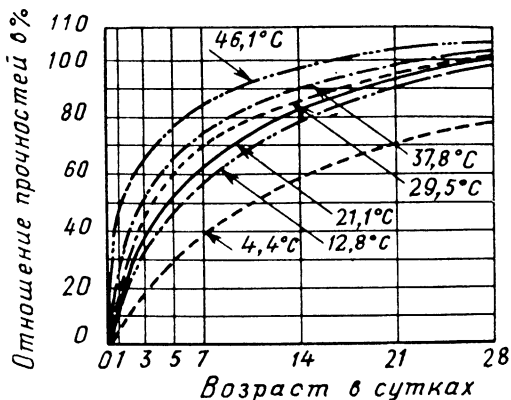


Рис. 5.26. Изменение во времени отношения прочности бетонов, твердевших при различных температурах, к 28-суточной прочности бетона, твердевшего при температуре  $21,1^\circ\text{C}$  ( $B/C=0,5$ ; образцы бетонировались и твердели при указанной температуре)

<sup>1</sup> Прочность бетона, замораживание при которой не вызывает снижения конечной прочности или ухудшения его других строительно-технических свойств, называют «критической». В соответствии с исследованиями С. А. Миронова и его школы [44] критическая прочность зависит от марки бетона и составляет от 50 до  $150\text{ кг/см}^2$  [45]. (Прим. ред.)

Ниже приведены значения коэффициентов  $A$  и  $B$ , предложенные Плоуманом, которые зависят от величины прочности бетона.

Прочность после 28-суточного выдерживания при температуре в $17,8^{\circ}\text{C}$ (зрелость $35\ 600^{\circ}\text{F}\cdot\text{ч}$ ) в $\text{кгс}/\text{см}^2$	Коэффициенты	
	$A$	$B$
Менее 175	-7	68
175—351	6	61
351—527	18	64
527—703	30	46,5

Можно видеть, что отношение прочность:зрелость зависит от свойств цемента и качества бетона, оно справедливо только в пределах определенных температур. Это очевидно, например, из графика на

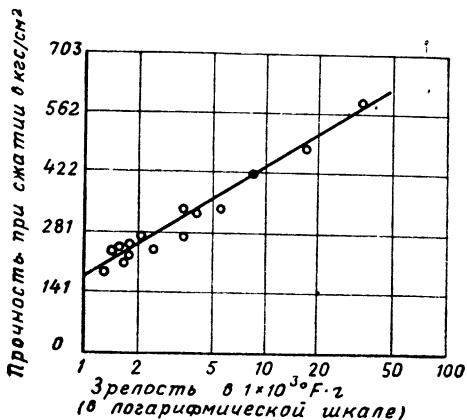


Рис. 5.27. Зависимость между зрелостью бетона и его прочностью

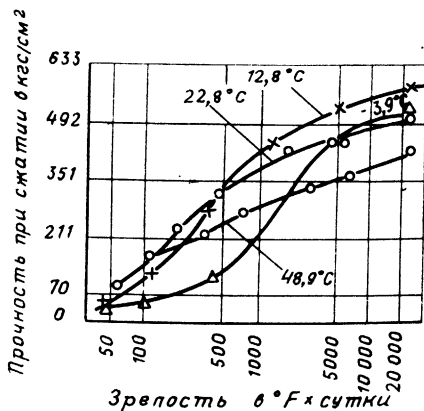


Рис. 5.28. Влияние температуры в течение первых 28 суток после бетонирования на отношение прочность:зрелость

рис. 5.28, полученного Клигером, который испытывал бетон на обычном порландцементе с  $B/C$ , равным 0,43 и вовлечением воздуха 4,5%, выдержанным при температуре  $22,8^{\circ}\text{C}$  начиная с возраста 28 суток. Дальнейшие затруднения возникают от того, что результаты воздействия на бетон более высоких температур различны: непосредственно после изготовления или в более поздние сроки твердения.

Все же правило зрелости хорошо применимо, когда первоначальная температура бетона колеблется в пределах  $15,6\text{—}26,7^{\circ}\text{C}$  и не происходит потерь влажности в результате высыхания.



## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА

Мы уже видели, что повышение температуры при твердении ускоряет химические реакции гидратации и таким образом благотворно воздействует на рост прочности бетона в ранние сроки без каких-либо отрицательных последствий, влияющих на последующую прочность. Однако более высокая температура при укладке и схватывании, хотя

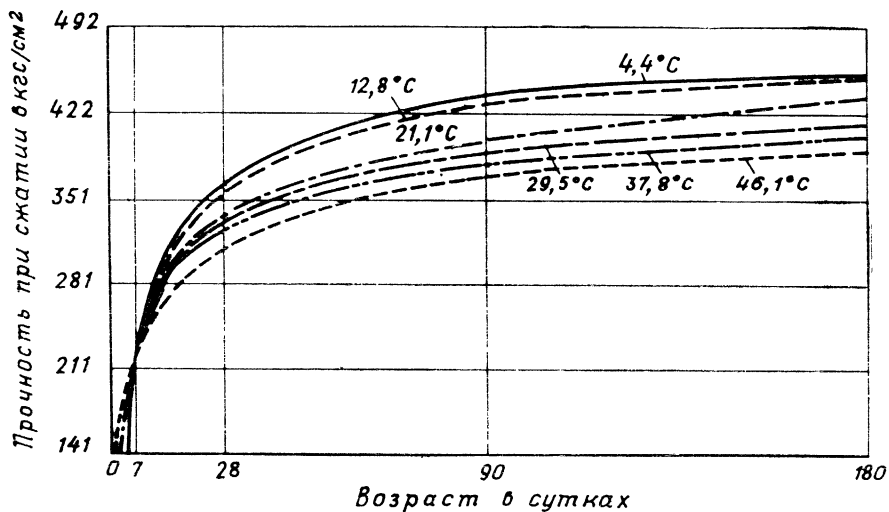


Рис. 5.29. Влияние температуры в течение первых двух часов после бетонирования на рост прочности бетона во времени

и повышает очень раннюю прочность, может неблагоприятно повлиять на прочность в возрасте от 7 суток и больше. Это объясняется тем, что при быстрой начальной гидратации образуются продукты с более плохой физической структурой, возможно более пористой, поэтому значительная часть пор всегда остается незаполненной. Из отношения гель : пространство вытекает, что это может привести к более низкой прочности по сравнению с менее пористым цементным камнем, хотя в нем происходила медленная гидратация, в конечном счете в таком цементном камне достигается высокое отношение гель : пространство.

На рис. 5.29 приведены данные Прайса о воздействии температуры в течение первых двух часов после изготовления на рост прочности бетона с  $V/C$ , равном 0,53. Исследовалось влияние температуры в интервале от 4,4 до 46,1°C, а спустя 2 ч образцы выдерживали при температуре 21,1°C. Все образцы были изолированы с целью предотвращения миграции влаги.

Были также проведены опыты на бетонах, хранившихся в воде при различных температурах в течение 28 суток, а затем при температуре

22,8°С. Как и в опытах Прайса, высокая температура привела к высокой прочности в течение первых нескольких суток после изготовления, но затем в возрасте от одной до четырех недель положение существенно изменилось (рис. 5.30). Образцы, выдержанные до 28 суток при температурах от 4,4 до 22,8°С, показали более высокую прочность по сравнению с образцами, выдержанными при температуре от 32,2 до 43,3°С. Для последних снижение прочности было тем больше, чем выше была температура; в интервале более низких температур имеется

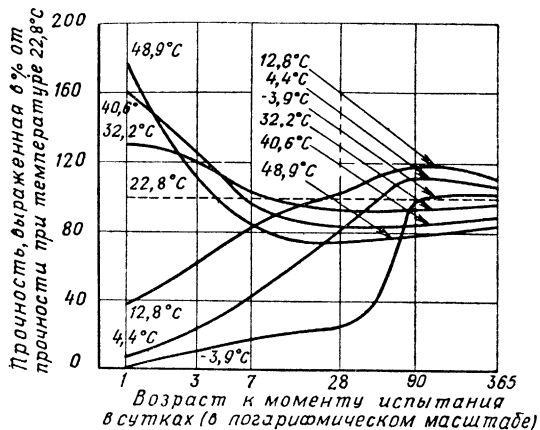


Рис. 5.30. Влияние температуры в течение первых 28 суток на прочность бетона ( $B/C=0,41$ ; содержание воздуха 4,5%) на портландцементе

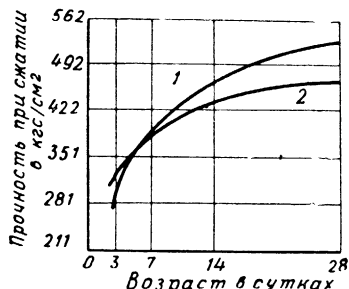


Рис. 5.31. Сравнение прочности бетона с  $B/C=0,40$ , твердевшего в условиях Англии (1) и Нигерии (2)

оптимальная, при которой бетон приобретает самую высокую прочность. Интересно отметить, что даже бетон, изготовленный при 4,4°С и хранившийся при низкой температуре (-3,9°С) в течение четырех недель, а затем при 23,9°С после трех месяцев, прочнее такого же бетона, хранившегося при постоянной температуре 23,9°С. На рис. 5.31 показаны типичные кривые для бетона с расходом портландцемента  $305 \text{ кг/м}^3$  при 4,5% вовлеченного воздуха. Подобное поведение наблюдалось, когда использовался быстротвердеющий портландцемент и модифицированный цемент. В бетонах с добавкой хлористого кальция вредное воздействие высокой температуры в период схватывания ослабляется.

Повышение прочности, вызванное добавлением хлористого кальция, зависит от температуры бетона и пропорционально возрастает с понижением температур. Например, при 12°С добавление 2% повышает односуточную прочность на 140%, а относительное увеличение в той же смеси при 48,9°С дает только 50%. Подобного поведения следовало ожидать, поскольку степень гидратации при более высоких температурах выше даже без катализатора, так что для действия  $\text{CaCl}_2$

остаётся мало возможности. Хлористый кальций обычно употребляется только при нормальных или низких температурах.

Опыты Клигера показывают, что существует оптимальная температура в раннем возрасте бетона, при которой обеспечивается наивысшая прочность в желаемом возрасте. Для бетона, изготовленного в лаборатории из обычного или модифицированного цемента, оптимальная температура примерно  $12,8^{\circ}\text{C}$ , для быстротвердеющего портландского цемента — около  $4,4^{\circ}\text{C}$ . Не следует забывать, однако, что после начального периода схватывания и твердения влияние температуры в определенном интервале соответствует правилу твердения: более высокая температура способствует росту прочности.

Все описанные до сих пор опыты проводили в лаборатории, и, по-видимому, режим на строительной площадке в жарком климате не может быть таким же. Существуют некоторые дополнительные факторы воздействия: влажность окружающей среды, прямая радиация солнца, скорость ветра и метод ухода. Следует напомнить также, что качество бетона зависит от его температуры, а не от температуры окружающей атмосферы. К тому же уход путем орошения в ветреную погоду приводит к потере тепла в результате испарения, так что температура бетона будет ниже, чем при применении изолирующих пленок. Шалон установила, что испарение непосредственно после изготовления благоприятно, возможно, потому, что вода испаряется из бетона в то время, когда капилляры еще могут разрушаться, что уменьшает эффективно водоцементное отношение. Если, однако, испарение приведет к высыханию поверхности, то может возникнуть пластическая усадка и образование трещин.

Опыты показали, что в жарких и сухих условиях, например в пустыне, прочность бетона уменьшается с увеличением температуры до критического значения примерно при  $30^{\circ}\text{C}$ , но между  $30$  и  $45^{\circ}\text{C}$  может быть незначительная упругая деформация или снижения прочности не будет. Подобное поведение наблюдалось при применении бетона без вовлеченного воздуха, твердевшего при относительной влажности от  $20$  до  $70\%$ . Возможно, что присутствие или отсутствие вовлеченного воздуха обусловили, по крайней мере частично, различия между результатами Клигера и Шалон. По-видимому, мы еще не знаем всех факторов, относящихся к данной проблеме, и прежде, чем начать строительство в новом климате, следует провести тщательные опыты на строительной площадке.

В целом, однако, можно ожидать, что бетон, укладываемый летом, будет иметь более низкую прочность, чем аналогичный бетон, изготовленный зимой. И действительно, на многих строительных площадках прочность контрольных образцов была ниже в жаркую погоду, хотя после раскрытия форм в возрасте  $24$  ч они выдерживались в воде при  $17,8^{\circ}\text{C}$ . В тропических странах также наблюдалась подобная более низкая прочность бетона (см. рис. 5.31).

## **ПРОПАРИВАНИЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ**

---

Поскольку повышение температуры при твердении бетона повышает интенсивность роста прочности, то достижение заданной прочности может быть ускорено пропариванием бетона в специальных камерах. Когда пар находится при атмосферном давлении, т. е. его температура ниже  $100^{\circ}\text{C}$ , твердение можно считать разновидностью влажного ухода. Выдерживание бетона при высоком давлении (автоклавная обработка) является совершенно другой технологией и рассматривается в следующем разделе. Пропаривание успешно применялось для бетонов, приготовленных на различных порландцементях, но его нельзя применять для бетона на глиноземистом цементе из-за вредного воздействия жары и влаги на прочность этого цемента. Бетон с более низким  $V/C$  реагирует на пропаривание намного лучше тощих бетонов.

Основная цель пропаривания заключается в получении достаточно высокой прочности на ранней стадии, так как бетонные изделия могут приобрести прочность вскоре после бетонирования. Раскрывать форму или освобождать оснастку предварительного напряжения можно значительно раньше, чем при обычном влажном выдерживании, при этом требуется меньшая производственная площадь для хранения при выдерживании; все это дает экономические преимущества. На практике для многих случаев прочность бетона в более поздние сроки имеет меньшее значение. Из-за характера операций, входящих в процесс пропаривания, оно применяется главным образом для сборных деталей. Пропаривание при низком давлении обычно осуществляют в специальных камерах или тоннелях, через которые бетонные элементы подают на конвейерной ленте. Или же предварительно изготовленные детали покрывают передвижными кожухами или крышками из пластика, под которые пар подается через гибкие шланги.

Учитывая влияние температуры на ранних стадиях твердения на позднейшую прочность, должно быть найдено компромиссное решение между температурами, дающими высокую прочность на ранней стадии и на более поздней стадии твердения. На рис. 5.32 показаны значения прочности бетона, изготовленного на модифицированном цементе с  $V/C$ , равным 0,55; пропаривание производилось непосредственно после изготовления.

Аналогичная проблема возникает при определении скорости повышения температуры в начале пропаривания. Установлено, что если температура  $48,9^{\circ}\text{C}$  достигается за период меньше 2—3 ч или температура  $98,9^{\circ}\text{C}$  — за период меньше 6—7 ч с момента перемешивания, то это отрицательно влияет на рост прочности после первых нескольких часов. Нельзя допускать такой быстрый подъем температуры. Быстрое твердение может привести к потере прочности на одну треть в более позднем возрасте по сравнению с влажным выдерживанием при комнатной температуре. Отрицательное действие быстрого подъема температуры заметнее при более высоком водоцементном отношении в смеси и оно более ощутимо при быстротвердеющем цементе по сравнению

с обыкновенным портландцементом. Саул установил, что когда скорость подъема температуры бетона не превышает значений, указанных ранее, то его прочность немного отличается от прочности нормально выдержанного бетона и находится в зоне А на рис. 5.33. Прочность слишком быстро нагреваемого бетона лежит в зоне В.

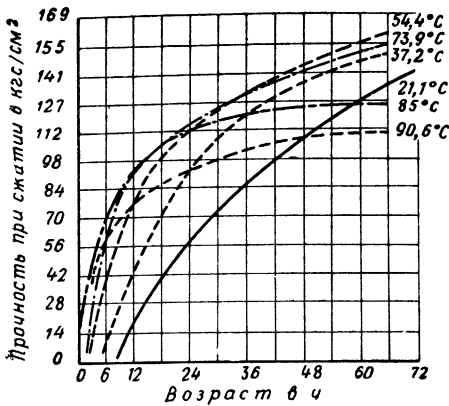


Рис. 5.32. Прочность бетона, пропаренного при различных температурах ( $V/C=0,5$ , пропаривание применено сразу после бетонирования)

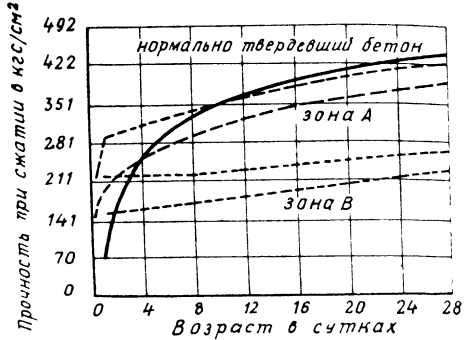


Рис. 5.33. Рост прочности пропаренного бетона во времени ( $V/C=0,5$ , быстро-твердеющий портландцемент)

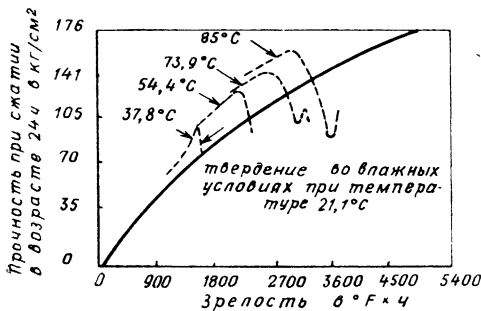


Рис. 5.34. Влияние перерыва в пропаривании на прочность бетона в раннем возрасте

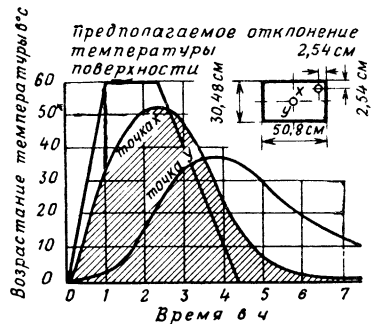


Рис. 5.35. Пример Росса, связанный с теплопередачей в двух направлениях в бетоне

Так как температура в период твердения оказывает наибольшее влияние на прочность на поздних стадиях, временное прекращение пропаривания является полезным. Некоторые сведения о влиянии перерыва в пропаривании на прочность можно получить из рис. 5.34, составленного Саулем по данным Шийделлера и Чэмберлена. Примененный бетон был изготовлен на модифицированном цементе с  $V/C$ , равном

0,6. Жирная линия показывает рост прочности в бетоне, выдержанном во влажных условиях при комнатной температуре. Пунктиром обозначены данные для различных температур выдерживания в интервале между 37,8 и 85°С, цифры против каждой точки обозначают перерыв пропаривания в часах до того, как была резко повышена температура пропаривания.

Из рис. 5.34 можно видеть, что для каждой температуры выдерживания существует часть кривой, показывающей нормальную степень роста прочности при твердении. Другими словами, после достаточного временного перерыва пропаривания быстрое нагревание не оказывает отрицательного действия. Это временное прекращение составляет примерно 2; 3,5 и 6 ч соответственно для температур 37,8; 54,4; 73,9 и 85°С. Если, однако, бетон подвергать действию более высокой температуры с меньшим перерывом пропаривания, что неблагоприятно влияет на прочность, как показано правой частью каждой пунктирной кривой, это воздействие более значительно по сравнению с более высокой температурой выдерживания.

На рис. 5.34 показано также, что в течение нескольких часов непосредственно после изготовления рост прочности бетона выше, чем можно было предположить из вычислений зрелости. Это совпадает с более ранним наблюдением, что возраст бетона при высокой температуре является важной характеристикой.

Практические режимы пропаривания выбираются как компромисс между требованиями прочности на ранней и поздней стадиях и обуславливаются также продолжительностью рабочей смены. Цикл пропаривания для данной бетонной смеси определяется экономическими соображениями.

При типичном цикле пропаривание начинается через 3 ч после изготовления, температура поднимается на 4,4°С в час и достигает 54,4—73,9°С, а затем продолжается в течение заданного периода времени. Бетон на легком заполнителе можно нагревать до 73,9—82,2°С.

Указанные температуры являются температурами пара, но они не обязательно совпадают с температурой пропариваемого бетона. В течение первого часа или двух часов после помещения в камеру температура бетона ниже температуры среды, но позднее в результате тепловыделения при реакции гидратации температура бетона оказывается выше температуры окружающей среды. Можно максимально использовать тепло в камере пропаривания, если пар выпустить раньше и установить длительный период охлаждения. Таким образом, оптимальная программа пропаривания должна включать период медленного повышения температуры, выдержку при максимальной температуре и период охлаждения.

Изменения температуры внутри бетона при пропаривании отличаются от изменений температуры на его поверхности. Повышение температуры в центре происходит медленно, соответственно скорость охлаждения также ниже. Таким образом, площадь под кривой «температура—время» примерно одинакова для внутренних точек и точек, расположенных ближе к поверхности бетонного блока, так что весь бетон

имеет одинаковую зрелость. Это было продемонстрировано Росом. На рис. 5.35 показаны расчетные кривые «температура — время» для длинного бетонного блока, подверженного различным температурам на поверхности, при этом влияние теплоты гидратации не учитывалось.

В прошлом можно было наблюдать, что, когда бетон выдерживался при высоких температурах, тепло при гидратации цемента выделялось так быстро, что повышение температуры наблюдалось даже в маленьких образцах. С другой стороны, при выдерживании при обычной температуре влияние теплоты гидратации было заметно только в массивных элементах.

В дополнение к пропариванию применялись и другие способы высокотемпературной обработки бетона. В частности, электрические методы нагревания током, проходящим через арматуру или непосредственно через бетон, оказались успешными. Ток должен быть переменным, поскольку постоянный ток приводит к гидролизу цементной массы.

### **ПРОПАРИВАНИЕ ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ**

Этот процесс отличается от пропаривания при атмосферном давлении как по технологии, так и по природе получаемого продукта.

Поскольку создается давление выше атмосферного, то камера пропаривания должна представлять собой резервуар высокого давления со снабжением влажным паром, при этом необходим избыток воды, так как нельзя допускать, чтобы перегретый пар входил в контакт с бетоном.

Пропаривание при повышенном давлении впервые было применено при производстве силикатного кирпича и до сих пор успешно применяется для этой цели. В области бетона автоклавная обработка обычно применяется для сборных элементов как из тяжелого, так и из легкого бетона в тех случаях, когда требуется одна из следующих характеристик: а) высокая прочность в раннем возрасте (28-суточная прочность может быть достигнута за 24 ч); б) повышенная долговечность (улучшается сопротивление бетона сульфатной агрессии к другим формам химического воздействия, а также замораживанию и оттаиванию, уменьшаются выцветы); в) низкая усадка и пониженная влагопередача.

Оптимальная температура обработки была установлена экспериментальным путем. Она составляет около  $176^{\circ}\text{C}$ , что соответствует давлению насыщенного пара  $8,4 \text{ кгс/см}^2$ .

Пропаривание при повышенном давлении наиболее эффективно, когда в цемент добавляется тонкоизмельченный кремнезем, благодаря чему происходит химическая реакция между кремнеземом и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , образующийся при гидратации  $\text{C}_3\text{S}$  (рис. 5.36). Цементы с повышенным содержанием  $\text{C}_3\text{S}$  способны дать более высокую прочность, когда они подвергаются автоклавной обработке, по сравнению с цементами с высоким содержанием  $\text{C}_2\text{S}$ , хотя для коротких режимов автоклавной

обработки получают хорошие результаты для цементов с умеренно низким отношением  $\frac{C_3S}{C_2S}$ .

Тонкость помола кремнезема должна быть такой же, как и цемента, и оба материала необходимо тщательно перемешать перед введением в бетономешалку. Оптимальное количество кремнеземистого компонента зависит от состава бетонной смеси, но обычно оно составляет 0,4—0,7 от веса цемента. В этом случае отношение известь:кремнезем в смеси составляет примерно 1. Высокая температура в период твердения влияет на гидратацию самого цемента. Например, некоторое количество  $C_3S$  может гидратироваться с образованием  $C_3SH_x$ .

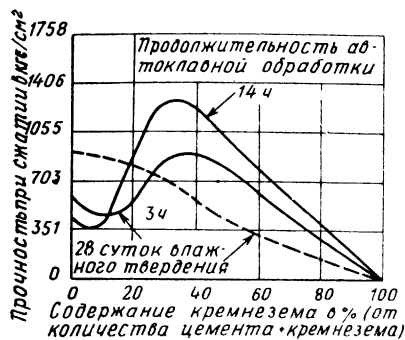


Рис. 5.36. Влияние содержания порошкообразного кремнезема на прочность бетона при автоклавном твердении (возраст в начале твердения 24 ч, температура твердения 177° С)

Высокая температура приводит к образованию цементного камня с низкой удельной поверхностью — порядка 70 000  $cm^2/g$ . Это означает, что продукты гидратации являются крупнозернистыми и преимущественно микрокристаллическими. Так как удельная поверхность теста, пропаренного при повышенном давлении, составляет только  $1/20$  удельной поверхности цемента, твердевшего при обычной температуре, то оказывается, что не более 5% теста, твердевшего при автоклавной обработке, можно считать гелем.

Ввиду микрокристаллической структуры цементного камня, пропаренного при повышенном давлении, бетон обладает пониженной усадкой, составляющей примерно от  $1/6$  до  $1/3$  усадки бетона, твердевшего при нормальной температуре.

Если к смеси добавляется кремнеземистый компонент, то усадка повышается, но все еще составляет около  $1/2$  усадки нормально твердевшего бетона. Наоборот, поскольку пропаривание при низком давлении не ведет к образованию микрокристаллического цементного камня, то и не происходит уменьшения усадки.

Продукты гидратации цемента, подвергнутого автоклавной обработке, так же, как и продукты вторичных реакций кремнезема с известью, являются постоянными и потому не наблюдается снижения прочности. В возрасте одного года прочность нормально выдержанного бетона примерно такая же, как и прочность автоклавного бетона того же состава. В/Ц влияет на прочность автоклавного бетона так же, как и бетона естественного твердения, но фактические прочности на ранней стадии естественно отличаются. Коэффициент термического расширения и модуль упругости бетона, по-видимому, не подвержены изменению в результате автоклавной обработки.

Автоклавная обработка улучшает стойкость к воздействию сульфатной агрессии. Это происходит по нескольким причинам, главная из



которых заключается в образовании алюминатов, более устойчивых при наличии сульфатов по сравнению с алюминатами, образованными при более низких температурах. Поэтому для цементов с высоким содержанием  $C_3A$  относительное увеличение стойкости к сульфатной агрессии больше, чем для умеренно сульфатостойких цементов. Другой важный фактор заключается в уменьшении содержания извести в цементном камне в результате реакции извести с кремнеземом. Дальнейшее улучшение сопротивления сульфатной агрессии происходит за счет увеличения прочности и непроницаемости пропаренного бетона, а также за счет образования гидратов хорошо кристаллизованной формы.

Автоклавная обработка уменьшает образование выцветов, поскольку не остается извести, которая может выщелачиваться.

К недостаткам можно отнести то, что автоклавная обработка понижает прочность сцепления бетона с арматурой примерно наполовину по сравнению с твердением в нормальных условиях, так что применение такой обработки для армированных бетонных конструкций считается нежелательным. Автоклавный бетон также более хрупок. В целом автоклавная обработка позволяет получать бетон хорошего качества, плотный и долговечный. Характерной особенностью автоклавного бетона является белесоватый оттенок, по которому его можно отличить от выдержанного при обычных условиях бетона, изготовленного на портландцементе.

Суущественно, чтобы скорость повышения температуры при автоклавной обработке не была слишком высока, наложение процессов схватывания и твердения должно происходить в порядке, подобном тому, как описано в разделе пропаривания при атмосферном давлении. Типичный цикл пропаривания состоит из постепенного увеличения температуры до максимальной в течение 3—5 ч. При этой температуре процесс длится 5—8 ч, а затем происходит снижение давления примерно на  $\frac{1}{4}$  в час. Быстрое снижение давления ускоряет высыхание бетона, что уменьшает усадку в период изготовления.

Отдельные стадии цикла пропаривания зависят от применяемой установки и размера бетонных конструкций. Продолжительность периода нормального выдерживания, предшествующего автоклавной обработке, не влияет на качество бетона. Выбор рациональной продолжительности периода определяется жесткостью смеси, которая должна быть достаточно связной, чтобы выдержать технологическую обработку. Для легких бетонов продолжительность отдельных стадий цикла пропаривания должна устанавливаться экспериментальным путем в соответствии с применяемыми материалами.

Пропаривание при повышенном давлении следует применять только для бетонов, изготовленных из портландцемента. Высокая температура отрицательно влияет на глиноземистый и гипсошлаковый цемент.

Тип портландцемента влияет на прочность, но не обязательно таким же образом, как при нормальных температурах. В этой области пока еще не проведены систематические исследования. Пропаривание при повышенном давлении ускоряет твердение бетона, содержащего

хлористый кальций, однако относительное увеличение прочности меньше, чем при отсутствии хлористого кальция.

### ОТКЛОНЕНИЯ В ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТА

До сих пор мы не рассматривали прочность цемента как переменную в прочности бетона. Здесь рассматривается влияние на прочность бетонов цементов одного типа.

Различие в прочности обычных и быстротвердеющих портландцементов показано на рис. 5.37. Однако эти цементы почти всегда соответствуют требованиям BS 12:1958. Прочность некоторых цементов иногда достигает значений, в 2,5 раза превышающих нормируемый минимум.

Хотя на строительной площадке трудно установить влияние цемента, все же несомненно, что естественные отклонения в прочности цемента отражаются на отклонениях прочности бетона. Таким образом, изменчивость свойств цемента имеет большое практическое значение, особенно ввиду того, что бетонная смесь должна быть заранее запроецирована для получения достаточной прочности даже в случае, если замес приготовлен на цементе низкой прочности. При этом более высокая средняя прочность цемента не дает никакого преимущества.

Если цемент имеет более низкую изменчивость (но ту же среднюю прочность), содержание цемента в смеси может быть уменьшено: определенные преимущества может дать классификация цементов по прочности, даже если это сопровождается повышением цены на них.

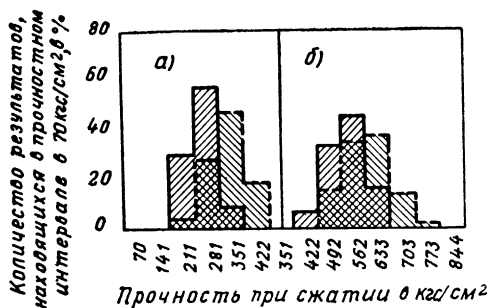


Рис. 5.37. Гистограмма для вибрированных растворов кубов, приготовленных на обычном и быстротвердеющем портландцементов а — возраст образцов 3 сут.; б — то же, 28 сут.

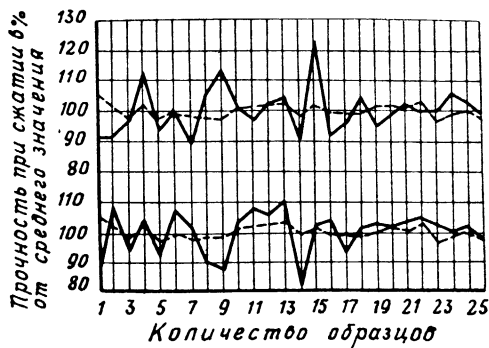


Рис. 5.38. Точность данных по прочности бетона по работам Сэма

Изменчивость прочности цементов вызвана прежде всего неоднородностью сырьевых материалов, используемых при его изготовлении не только при различных источниках их получения, но и в одном карьере. Кроме того, различия в деталях процессов изготовления и прежде все-

го изменения в содержании золы в каменном угле, применяемом в обжиговой печи, способствует увеличению изменчивости свойств торговых цементов.

О величине изменчивости прочности цемента можно судить по графику рис. 5.38, который дает результаты опытов на стандартных цементных растворах, изготовленных с применением проб цементов, полученных на одних и тех же предприятиях США с двухнедельными интервалами. Прочность выражена как процент средней прочности всех проб данного предприятия, а каждая кривая является средней величиной соотношений прочности, полученных на 3,7- и 28-е сутки. Вариации в прочности в результате самих испытаний обозначены пунктирной линией, которая показывает отношения прочностей для опытов, проведенных в то же самое время с применением контрольного исходного цемента. Ошибки при испытании для коэффициента вариации обычно составляют 2,5—4 %.

Стандартное отклонение прочности бетона из-за изменчивости свойств цемента не увеличивается с возрастом. Поскольку, однако, с возрастом прочность увеличивается, коэффициент вариации прочности становится тем меньше, чем больше возраст бетона во время испытаний. Такое поведение не удивительно, так как значительная часть изменчивости прочности цемента обусловлена различиями в тонкости помола цемента и содержании  $C_3S$ . Влияние этих факторов более существенно в раннем возрасте, с течением времени они теряют свое значение. Наоборот, стандартное отклонение в партии увеличивается с повышением средней прочности. В табл. 5.4 приведены данные Райта изменчивости цемента при испытании в различных возрастах, а табл. 5.5 дает приближенные значения стандартного отклонения прочности бетона, изготовленного на строительной площадке.

Из приведенных данных видно, что применение цемента различных заводов или даже применение различных партий цемента с одного предприятия ведет к заметным изменениям в прочности бетона. Этот эффект может иметь существенное значение при больших объемах работ. Применение цемента из одной партии может привести к уменьшению содержания цемента до 10%. Не следует забывать, однако, что изменения в цементе обуславливают самое большее половину изменчивости в прочности образцов, изготовленных на строительной площадке.

В заключение следует подчеркнуть, что изменчивость свойств цемента воздействует в большей степени на раннюю прочность бетона, т. е. прочность, наиболее часто устанавливаемую экспериментальным путем, но отнюдь не обязательно, что эта прочность имеет решающее практическое значение. Более того, прочность является не единственной главной характеристикой бетона: из соображений долговечности и водонепроницаемости может потребоваться большее содержание цемента, чем это необходимо для получения требуемой прочности, в таком случае изменчивость прочности цемента становится несущественной.

Важное влияние качества воды затверждения на прочность бетона уже неоднократно отмечалось. Качество воды также может иметь свое значение: примеси в воде могут помешать схватыванию цемента, могут отрицательно повлиять на прочность бетона или вызвать коррозию его поверхности, кроме того, могут привести к коррозии арматуры. По этим причинам следует учитывать пригодность воды для приготовления бетонной смеси и ухода за бетоном. Должно быть проведено ясное различие между воздействиями воды при приготовлении и воздействием агрессивных вод на затвердевший бетон. Некоторые агрессивные воды могут быть безвредны и даже благоприятны, когда применяются для затверждения.

Во многих нормах качество воды определяется ее пригодностью для питья. Такая вода крайне редко содержит растворенные твердые вещества в количестве больше 2000 частей на миллион и, как правило, меньше 1000 частей на миллион.

Для отношения  $V/C=0,5$  последнее соотношение соответствует количеству твердых веществ, составляющих 0,05% веса цемента, в этом случае любое влияние обычных твердых веществ будет незначительным. Таким образом, несмотря на то что применение питьевой воды является безопасным, при изготовлении бетона может часто и успешно применяться непитьевая вода.

Как правило, вода, которая не показывает при испытании содержание солей, пригодна для употребления, но темный цвет или плохой запах не обязательно обозначает, что присутствуют вредные вещества. Простейший способ определения пригодности такой воды заключается в сравнении времени схватывания цемента и прочности кубиков из цементного раствора с соответствующими результатами, полученными при употреблении известной «хорошей воды» или дистиллированной воды. Обычно допускаются отклонения в прочности в пределах 10%.

Поскольку нежелательно вводить в бетон большое количество ила, воду с высоким содержанием твердых частиц во взвешенном состоянии следует перед употреблением пропустить через отстойный бассейн, при этом допустимым является содержание мелких частиц не более 2000 частей на миллион.

Солоноватая вода содержит хлориды и сульфаты. Когда содержание хлорида не превышает 500 частей на миллион или  $SO_3$  не превышает 1000 частей на миллион, вода является безвредной, но успешно применяется и вода с более высоким содержанием соли. Морская вода характеризуется содержанием солей примерно 3,5% (78%  $NaCl$  и 15%  $MgCl_2$  и  $MgSO_4$ ). Она обеспечивает повышенную раннюю прочность и пониженную прочность в позднем возрасте. Потеря прочности обычно не превышает 15% и часто может быть допущена. Морская вода несколько ускоряет время схватывания цемента, но это влияние обычно не существенно.

Вода, содержащая большое количество хлоридов, как, например, морская, имеет тенденцию вызывать стойкую влажность и выцветы поверх-

ности. Такую воду не следует употреблять там, где важен внешний вид бетона, или там, где должна быть применена гипсовая отделка.

В случае армированного бетона морская вода может увеличить коррозию арматуры, хотя не существует экспериментального свидетельства того, что применение морской воды в смеси ведет к коррозии стальной арматуры. Повышенная опасность, вероятно, существует в тропических странах. Коррозия наблюдалась в сооружениях, расположенных во влажном воздухе, когда защитный слой был недостаточен или бетон был недостаточно плотен для того, чтобы не имела место коррозия под действием солей в условиях влажности. С другой стороны, когда железобетон находится постоянно в воде (либо морской, либо пресной), применение морской воды для затворения бетона, кажется, не должно иметь вредных последствий. Однако на практике обычно считается нежелательным применять морскую воду в качестве воды затворения, если этого можно избежать. В бетоне, применяемом для предварительно напряженных конструкций, применение морской воды не допускается, так как она может вызвать коррозию арматуры малых диаметров.

В этой связи следует рассмотреть применение морских заполнителей, полученных из морских отложений. Высушенный морской песок мо-

Таблица 5.2. Изменения прочности строительного раствора и бетона, изготовленного на различных партиях цемента с одного предприятия

		Возраст бетона в момент испытаний в сутках					
		1	3	7	28	91	365
BS 12: 1947, стандартный раствор	Средняя прочность в $кгс/см^2$ . . . . .	62	224	355	516	615	705
	Стандартное отклонение	32	56	51	40	43	45
	Коэффициент вариации в % . . . . .	3,6	1,8	1	0,6	0,5	0,4
	Стандартное отклонение между партиями в $кгс/см^2$ . . . . .	32	65	51	37	37	40
	То же, в партиях в $кгс/см^2$ . . . . .	5,6	10,5	1,3	20	35	34
1 : 1,5 : 3, бетон с $V/C=0,5$	Средняя прочность в $кгс/см^2$ . . . . .	156,7	277	312	404	510	586
	Стандартное отклонение в $кгс/см^2$ . . . . .	47	44	39	49	46	46
	Коэффициент вариации в % . . . . .	2,1	1,1	0,9	0,8	0,6	0,6
	Стандартное отклонение между партиями в $кгс/см^2$ . . . . .	46	44	38,7	49	46	46
	То же, в партиях в $кгс/см^2$ . . . . .	7,7	11	11,2	16	17	19

жет содержать большое количество соли, но, если используется песок, добытый землечерпалкой из моря, и воде дают стечь, а в качестве воды затворения для смеси применяется пресная вода, то содержание соли составляет не более 1% общего веса воды.

**Таблица 5.3. Стандартные отклонения прочности бетона в результате изменчивости свойств цемента**

Причина изменчивости	Стандартное отклонение в кгс/см <sup>2</sup>	
	хороший контроль	отличный контроль
Изменения свойств, возникающие на строительной площадке . . . . .	32	49
Различие свойств цемента с одного предприятия . .	28	28
Общая изменчивость для случая, когда цемент берется с одного предприятия . . . . .	42	56
Различия свойств цементов разных заводов . . . . .	49	49
Общая изменчивость для случаев, когда цемент взят с различных предприятий . . . . .	43	74

Естественно, слабокислые воды безвредны, но вода, содержащая гумусовые или другие органические кислоты, может отрицательно воздействовать на твердение бетона. Такую воду, так же как и высокощелочную, следует подвергнуть испытанию. Влияние различных ионов различно, как показал Стейнор.

Интересно отметить, что присутствие морских водорослей в воде для затворения приводит к воздухововлечению и последующей потере прочности. Применение морских водорослей, однако, является практическим средством вовлечения воздуха.

Что касается ухода за бетоном, пригодная для затворения вода также пригодна и для ухода за бетоном. Однако железистые или органические вещества могут привести к образованию пятен, особенно если вода медленно течет по бетону и быстро испаряется.

Нельзя на основе химического анализа установить возможность образования пятен, это определяется опытным путем.

## УПРУГОСТЬ, УСАДКА И ПОЛЗУЧЕСТЬ

---

В главе рассматриваются различные виды деформаций бетона. Бетон, подобно другим материалам, обладает в определенной степени упругостью<sup>1</sup>.

При длительном действии нагрузки деформации бетона увеличиваются во времени, т. е. бетону присущи деформации ползучести. Кроме того, независимо от действия нагрузки в процессе твердения имеет место усадка бетона.

Значение всех этих деформаций велико, поэтому изучению их должно быть уделено одинаково большое внимание.

### МОДУЛЬ УПРУГОСТИ

---

На рис. 6.1 приведена типичная диаграмма напряжение — деформация бетонного образца при нагрузке и разгрузке сжимающим или растягивающим усилием.

Строго говоря, термин «модуль упругости» (модуль Юнга) относится непосредственно только к прямолинейному участку диаграммы напряжение — деформация или, в случае отсутствия такого участка, к касательной к кривой, проходящей через начало координат. Этот начальный модуль имеет небольшое практическое значение. Можно определить модуль упругости по касательным, проходящим через любую точку графика напряжение — деформация, однако этот модуль применим только при очень малых отклонениях нагрузки выше или ниже того уровня, при котором этот модуль определяется.

Величина наблюдаемых деформаций и ход кривой напряжение—деформация зависят, по крайней мере частично, от скорости приложения нагрузки. Когда нагрузка прилагается чрезвычайно быстро, например менее чем за 0,01 сек, деформации резко снижаются и кривизна зависимости напряжение—деформация становится чрезвычайно малой. Уве-

---

<sup>1</sup> Под абсолютно упругим материалом понимают такой материал, в котором деформации возникают и исчезают мгновенно после приложения и снятия нагрузки. Это поведение и нелинейный характер зависимости напряжение — деформация. Упругое поведение и нелинейный характер зависимости напряжения — деформация присущи, например, стеклу и некоторым скальным породам. Небольшой изогнутый участок кривой, иногда имеющий место при начальном сжатии, обусловлен наличием тонких усадочных трещин.

личение времени нагружения с 5 сек до 2 мин может изменить деформацию на 15%, но в пределах интервала от 2 до 10 мин (и даже до 20), т. е. за время, обычно применяемое при испытаниях образцов на стандартном испытательном оборудовании, увеличение деформаций ничтожно мало.

Увеличение деформации под нагрузкой или часть такого увеличения обусловлено ползучестью бетона, однако разделение упругой и пластической части деформации затруднительно из-за зависимости мгновенной деформации от скорости загрузки.

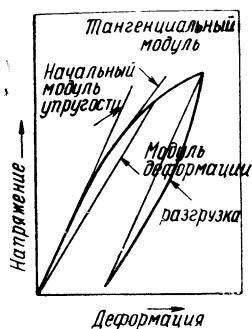


Рис. 6.1. Типичная диаграмма напряжения — деформация бетона

Для практических целей разделение деформаций производят следующим образом: деформация за время нагружения считается упругой, дальнейшее увеличение деформации протекает за счет ползучести бетона. Модуль упругости, удовлетворяющий этому условию, показан на рис. 6.1 как модуль деформации. Стандартных методов определения модуля деформации в настоящее время нет; в некоторых лабораториях он определяется при уровнях напряжений в интервалах от 28 до 140 кгс/см<sup>2</sup>, в других — при напряжениях, достигающих 15, 25, 33 или 50% разрушающей нагрузки. Поскольку модуль деформации уменьшается с увеличением напряжения, то напряжение, при котором он определяется, всегда должно быть установлено. Этот модуль является статическим модулем упругости, так как определяется он из отношения напряжения к деформации, которое в противоположность динамическому модулю устанавливается на уровне 280 кгс/см<sup>2</sup>.

Определение начального модуля упругости связано со значительными трудностями, однако его приблизительная величина может быть определена косвенным путем: секущая к кривой напряжение—деформация на ветви разгрузки часто, хотя и не во всех случаях, параллельна касательной, проходящей через начало координат (рис. 6.1). Повторная нагрузка и разгрузка уменьшает ползучесть, поэтому диаграмма напряжение—деформация, полученная после трех или четырех нагружений, характеризуется весьма малой кривизной. Этот метод определения модуля упругости включен в стандарт BS 1881 : 1952.

Влияние ползучести на величину общей деформации значительно уменьшается при измерениях деформаций в малом диапазоне изменения напряжений, однако в этом случае точный замер деформации представляет большие трудности.

На рис. 6.2 представлен график деформаций бетона различной прочности в зависимости от отношения действующих напряжений к прочности бетона. Под нагрузкой, составляющей половину конечной прочности, более высокой величиной деформации характеризуется бетон большей прочности. При этом для любых двух бетонов отношение их деформаций значительно меньше, чем отношение их прочностей, т. е.



Таблица 6.1. Величины усадки растворных и бетонных образцов площадью поперечного сечения  $36 \text{ см}^2$  при хранении при  $20^\circ \text{C}$  и относительной влажности  $50\%$

Отношение за-полнитель:це-мент	Усадка ( $10^{-6}$ ) через 6 мес. при В/Ц, равном			
	0,4	0,5	0,6	0,7
3	800	1200	—	—
4	550	850	1050	—
5	400	600	750	850
6	300	400	550	650
7	200	300	400	500

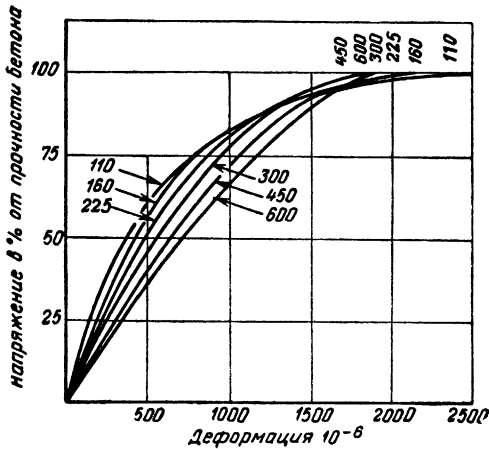


Рис. 6.2. Зависимость между деформацией и отношением напряжения к прочности для бетонов различной прочности

бетон большей прочности характеризуется большей величиной модуля упругости (табл. 6.1).

На рис. 6.2 показаны максимальные значения деформаций при разрушении бетона. Эти деформации тем больше, чем ниже прочность бетона.

Модуль упругости бетона увеличивается пропорционально корню квадратному из его прочности. Эта зависимость справедлива только для основной части графика и зависит от условий испытания образцов: водонасыщенные образцы характери-

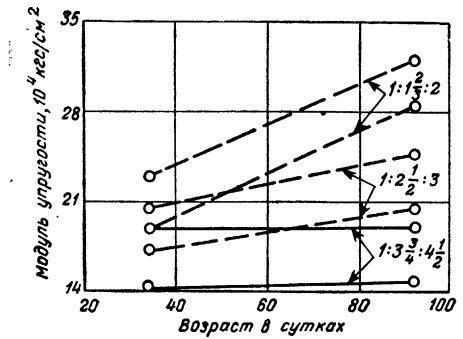


Рис. 6.3. Влияние влажностных условий испытаний на величину модуля деформаций (при  $56 \text{ кгс/см}^2$ ) бетонов различного возраста

зуются более высоким модулем упругости, чем сухие (рис. 6.3), в то время как прочности их находятся на одном уровне. Свойства заполнителя также влияют на модуль упругости бетона; с увеличением модуля упругости крупного заполнителя увеличивается модуль упругости бетона. Форма поверхности крупного заполнителя и характеристика его поверхности могут также влиять на величину модуля упругости бетона и на вид графической зависимости напряжение — деформация (рис. 6.4).

Ниже приведен модуль упругости бетона различной прочности, определенный в соответствии с руководством СР 2007—1960 по проектированию предварительно напряженного бетона.

Среднее значение прочности бетонных кубов при сжатии в кгс/см <sup>2</sup>	Модуль упругости $\times 10^4$ в кгс/см <sup>2</sup>
280	28
350	32
420	35
560	42
700	46

Соотношение между модулем упругости и прочностью бетона зависит также от количественного соотношения компонентов в смеси (модуль упругости заполнителей обычно выше, чем модуль упругости цементного камня) и от возраста образцов: с увеличением возраста бетона модуль упругости его растет быстрее, чем прочность.

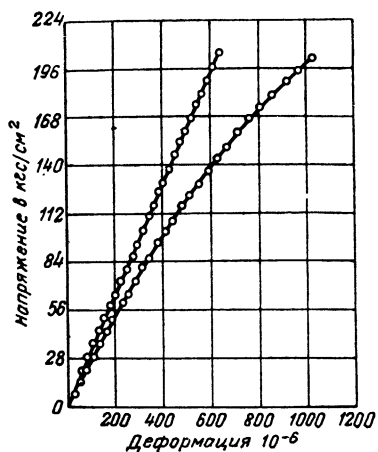


Рис. 6.4. Соотношение напряжения — деформации для бетонов на различных крупных заполнителях

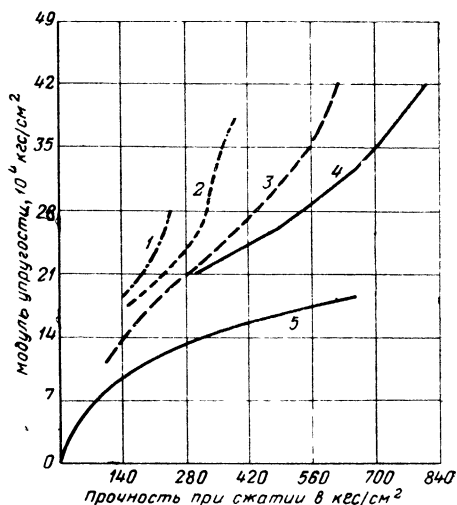


Рис. 6.5. Статический модуль упругости бетонов на гравии и керамзите при испытаниях в различном возрасте до 1 года

1, 2, 3, 4 — гравийные смеси; 5 — керамзит

Эту зависимость можно четко проследить на рис. 6.5, где также приводятся результаты испытаний бетона на керамзите. Модуль упругости бетона на легком заполнителе обычно составляет от 40 до 80% модуля упругости тяжелого бетона той же прочности, при этом модуль упругости легкого бетона не зависит от модуля упругости цементного камня и соотношения компонентов в составе бетона.

Соотношение между модулем упругости и прочностью бетона остается неизменным при действии повышенных (до 230° С) температур, поскольку в этом температурном интервале и модуль упругости и прочность бетона изменяется с повышением температуры по одному закону.

Выше были рассмотрены вопросы, связанные с модулем упругости при сжатии, однако для ряда бетонов модуль упругости при растяжении имеет те же значения, что и модуль упругости при сжатии. Модуль упругости при растяжении может быть определен по результатам испытаний образцов на изгиб, при этом, в случае необходимости, производится корректировка результатов на влияние среза.

При испытаниях на изгиб на графической зависимости напряжения — деформация имеется нисходящая ветвь кривой при нагрузках, близких к разрушающим, т. е. имеет место уменьшение напряжений, сопровождающееся увеличением деформаций бетона (рис. 6.6). Такое же явление наблюдается и при испытаниях на сжатие при условии, что образец загружается при постоянной величине деформации.

Модуль упругости при срезе прямыми экспериментами не определяется.

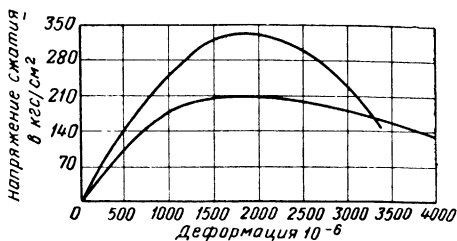


Рис. 6.6. Диаграмма напряжение — деформация бетона при испытаниях на изгиб

### ДИНАМИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ УПРУГОСТИ

Динамический модуль упругости отражает только упругие свойства материала без влияния ползучести, поскольку при колебаниях образца в нем появляются напряжения, весьма незначительные по величине. По этой причине динамический модуль упругости приблизительно

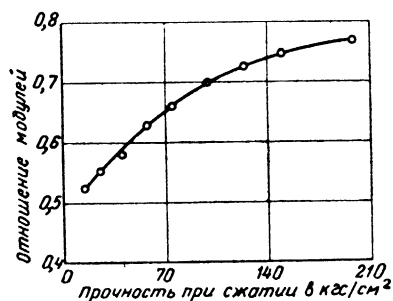


Рис. 6.7. Отношение статического модуля упругости к динамическому для бетонов различной прочности (динамический модуль определен продольной вибрацией цилиндров)

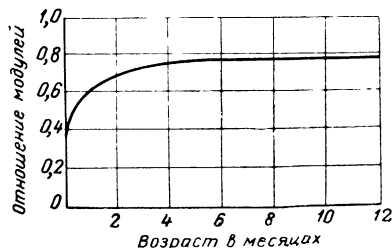


Рис. 6.8. Отношение статического модуля упругости к динамическому для бетона в разных возрастах. Статический модуль определялся при напряжении 70 кгс/см²

равен начальному модулю упругости, определенному при статических испытаниях, и значительно выше статического модуля деформаций. Разница в величинах динамического и статического модуля обусловлена также тем, что гетерогенность бетона влияет на эти модули по различному механизму. На рис. 6.7 показан график зависимости величины отношения статического модуля к динамическому от прочности бетона. Для исследованного состава это отношение увеличивается с возрастом бетона (рис. 6.8).

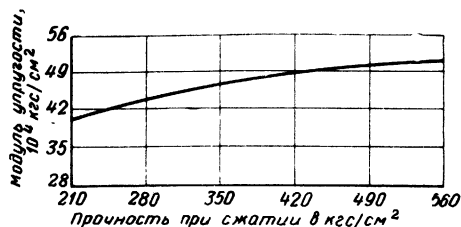


Рис. 6.9. Соотношение между динамическим модулем упругости и прочностью бетона при сжатии

На рис. 6.9 показана типичная зависимость динамического модуля упругости, определенного на цилиндрах, от прочности бетона. На характер этой зависимости не влияют количество вовлеченного воздуха, условия твердения, методы испытаний, вид цемента.

Динамический модуль упругости может быть также определен по скорости распространения импульса ультразвуковой частоты. Зависимость между скоростью  $V$  и модулем упругости  $E$  может быть выражена уравнением

$$E = \rho V^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu},$$

где  $\rho$  — плотность бетона;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Значение динамического модуля упругости, определенного по этому методу, зависит от величины коэффициента поперечной деформации, которая обычно точно неизвестна, а изменение величины коэффициента Пуассона от 0,16 до 0,25 приводит к уменьшению величины динамического модуля упругости на 11%. Поэтому определение динамического модуля упругости этим методом обычно не рекомендуется.

### КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА

Коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) бетона используется при проектировании и анализе работы многих типов конструкций. Величина коэффициента Пуассона, рассчитанная по экспериментально измеренным деформациям, колеблется от 0,11 до 0,21 (обычно от 0,15 до 0,2) как для легкого, так и для обычного бетонов. При динамических измерениях коэффициент Пуассона достигает больших значений, составляющих в среднем 0,24.

Динамический метод основывается на измерении скорости  $V$  и резонансной частоты продольных колебаний балки длиной  $L$ . Коэффициент Пуассона  $\mu$  может быть рассчитан из выражений:

$$\left(\frac{V}{2\pi L}\right)^2 = \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)},$$

так как

$$\frac{E}{\rho} = (2nL)^2,$$

где  $\rho$  — плотность бетона.

Коэффициент Пуассона может быть также определен по известным значениям модуля Юнга  $E$  и модуля упругости при сдвиге  $G$  из выражения

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1.$$

Модуль упругости при сдвиге  $G$  определяется по резонансной частоте колебаний. Величина  $\mu$ , вычисленная из этого выражения, находится между значениями  $\mu$ , определенными из прямых измерений деформаций и динамических измерений.

Достаточно убедительных данных по изменению коэффициента Пуассона в зависимости от возраста, прочности и других свойств бетона не имеется, однако обычно полагают, что для бетона высокой прочности значения коэффициента Пуассона ниже.

При высоких уровнях нагрузки коэффициент Пуассона быстро увеличивается из-за трещинообразования внутри испытуемых образцов (рис. 6.10).

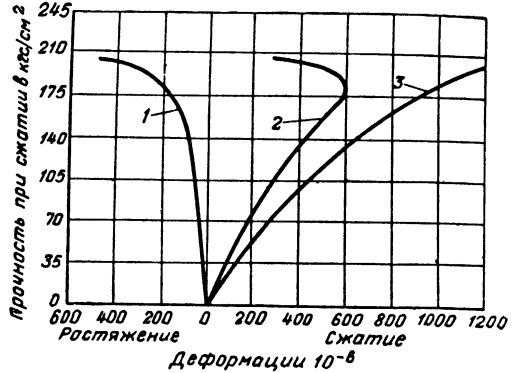


Рис. 6.10. Деформации по испытаниям призм на сжатие до разрушения бетона  
деформации: 1 — поперечные; 2 — объемные; 3 — продольные

### НАЧАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМА

При гидратации цемента имеет место сокращение объема системы цемент—вода. В то время, как твердеющее цементное тесто находится в пластическом состоянии, в нем имеет место объемная усадка (контракция), величина которой достигает 1% объема сухого цемента.

Такое сокращение объема известно под названием пластической усадки, поскольку оно имеет место в бетоне, находящемся в пластичном состоянии. Потеря воды из-за испарения ее с поверхности бетона или из-за поглощения ее сухим бетоном усугубляет действие пластической усадки и может привести к образованию поверхностных трещин, хотя такое растрескивание также возможно и при отсутствии испарения воды. Трещины обычно развиваются в местах неоднородности структуры бетона, например вокруг арматуры или крупных частиц заполнителя.

Величина этой усадки, как видно из рис. 6.11, тем больше, чем больше содержание цемента и чем меньше жесткость бетонной смеси. Предполагалось, что величина усадки тем меньше, чем больше способность бетона к водоотделению, однако наличие такой зависимости не подтверждено.

Изменение объема, наблюдающееся после схватывания бетона, может проявляться либо в виде усадки, либо в виде набухания. Дальнейшая гидратация бетона, протекающая в условиях доступа воды, сопровождается увеличением объема, но при отсутствии такого доступа имеет место усадка, которая известна как аутогенная усадка или аутогенное изменение объема и на практике развивается внутри больших бетонных масс. Величина такой линейной усадки колеблется от  $40 \times 10^{-6}$  в возрасте одного месяца до  $100 \times 10^{-6}$  для бетона в возрасте 5 лет (измерено как линейная усадка).

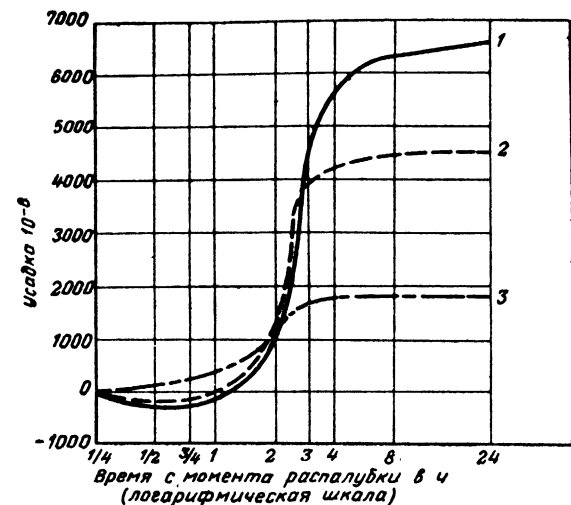


Рис. 6.11. Влияние содержания цемента в смеси на начальную усадку бетона по испытаниям на воздухе в условиях 50% относительной влажности при 20° С

1 — цементный камень; 2 — цементный раствор 1 : 3, В/Ц=0,5; 3 — бетон, содержание цемента от 170 до 400 кг/м<sup>3</sup>

Величина контракционной усадки бетона сравнительно мала, и в практических целях ее обычно не выделяют из величины общей усадки, вызываемой высыханием бетона. Усадка при высыхании обычно включает в себя величины контракционной и аутогенной усадки.

### МЕХАНИЗМ УСАДКИ

Изменение объема высыхающего бетона не равно объему удаленной из него воды. Потеря бетоном первых порций свободной воды не вызывает усадки или же вызывает незначительную усадку. При дальнейшем высыхании начинается удаление адсорбционно связанной воды. Этот процесс сопровождается изменением объема цементного камня, величина которого равна приблизительно объему мономолекулярного слоя воды, обволакивающего все частицы цементного геля.

Поскольку «толщина» молекулы воды составляет около 1% размера частицы геля, линейное изменение размеров цементного камня при

окончательном высушивании должно составлять величину порядка  $10\,000 \times 10^{-6}$ , в действительности получались значения до  $4000 \times 10^{-6}$ .

С увеличением размеров частиц цемента наблюдается уменьшение величины усадки. Усадка цементного камня автоклавного твердения, который характеризуется микрокристаллической структурой и имеет низкую удельную поверхность, в 5—10 и иногда в 17 раз меньше усадки при нормальном твердении.

### НАБУХАНИЕ

Цементный раствор или бетон при длительном хранении в воде характеризуется набуханием, т. е. увеличением объема и веса. Это набухание обусловлено адсорбцией воды цементным камнем: молекулы воды обладают расклинивающим действием и уменьшают межмолекулярные силы. Кроме того, вода вызывает уменьшение поверхностного натяжения материала, вследствие чего также происходит некоторое расширение бетона.

Линейное расширение в воде образцов из цементного теста по отношению к размерам образцов через 24 ч после их изготовления имеет следующие величины:

$1300 \times 10^{-6}$	через 100	суток
$2000 \times 10^{-6}$	через 1000	»
$2200 \times 10^{-6}$	через 2000	»

Набухание бетона значительно меньше, величина его колеблется от  $100 \times 10^{-6}$  до  $150 \times 10^{-6}$  для бетона с содержанием цемента  $250 \text{ кг/м}^3$ . Такая величина набухания наблюдается через 6—12 месяцев хранения в воде бетонных образцов, при дальнейшем хранении величина набухания незначительна.

Набухание сопровождается увеличением веса бетона на величину около 1%.

### УСАДКА ПРИ ВЫСЫХАНИИ БЕТОНА

Удаление воды из бетона при хранении его на открытом воздухе вызывает усадку. Возможно, что усадка или часть ее вызвана удалением из цементного камня химически связанной воды. Известно, что гидросиликат кальция при высушивании характеризуется сокращением размеров кристаллической решетки от 14 до 9 Å. Аналогичное сокращение размеров присуще и гидросульфаталюминату кальция и гидрату четырехкальциевого алюмоферрита. Таким образом, нельзя определить, связана ли усадка с удалением внутри или вне кристаллической влаги. Однако, поскольку величина усадки для портландцемента и глиноземистого цемента одинакова, очевидно, основная причина усадки заключена в физической природе цементного геля, а не в его химическом или минералогическом составе.

Зависимость между потерей воды и величиной усадки показана на рис. 6.12. Для чистого цементного камня эти две величины связаны друг с другом прямой пропорциональной зависимостью при условии,

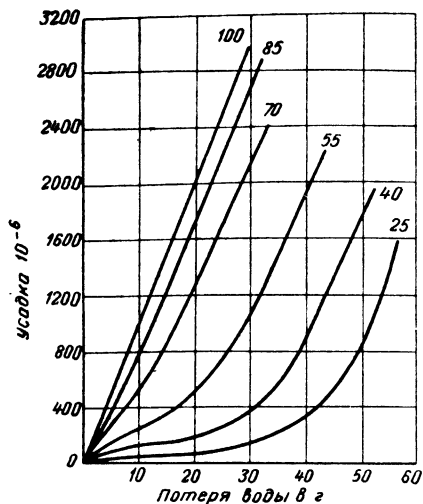


Рис. 6.12. Зависимость между усадкой и потерей воды цементного камня из цемента с добавкой порошкообразного кремнезема при твердении в течение 7 суток при 20°С с последующим высушиванием (цифры на кривых — содержание цемента в %)

что в цементном камне нет капиллярной влаги и удаляется только адсорбционно связанная вода. В смеси с добавкой к цементу молотого кремнезема, где для затворения требуется большее количество воды (т. е. для смесей с большим  $B/C$ ), даже после полной гидратации цемента имеется определенное содержание капиллярной влаги. Удаление капиллярной влаги вначале не сопровождается усадкой системы, однако после того, как свободная вода удалена из цементного камня, начинается удаление адсорбционно связанной воды, которое сопровождается усадкой, протекающей с теми же закономерностями, что и в чистом цементном камне. Поэтому участки кривых на рис. 6.12, характеризующие усадку за счет удаления адсорбционно связанной воды, имеют одинаковый наклон для смесей с различным содержанием цемента. Бетоны, в которых свободная вода содержится в крупном заполнителе или в больших порах и дефектах структуры, характеризуются большим разнообразием форм кривых усадки.

#### ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УСАДКУ

В табл. 6.1 приведены величины усадки, полученные для бетонных и растворных образцов площадью поперечного сечения 36 см<sup>2</sup> после 6 месяцев хранения при температуре 20°С и относительной влажности воздуха 50%. Однако эти величины являются ориентировочными, поскольку усадка зависит от многих факторов.

Наибольшее влияние на величину усадки бетона оказывает заполнитель. Усадка бетона  $y_6$  составляет часть усадки чистого цементного теста  $y_ц$ , она зависит от количества введенного заполнителя  $a$  и выражается уравнением вида

$$y_6 = y_ц (1 - a)^n.$$

Величина эмпирического коэффициента  $n$  колеблется от 1,2, до 1,7. На рис. 6.13 приведена зависимость усадки бетона от количества введенного в него заполнителя при величине  $n=1,7$ . Величина и форма крупного заполнителя в чистом виде не влияет на усадку бетона, однако использование крупного заполнителя позволяет применять более тонкие смеси с меньшим содержанием цемента, что приводит к уменьше-



нию величины усадки. Увеличение максимальной крупности заполнителя от 6 до 150 мм позволяет поднять содержание заполнителя в смеси от 60 до 80%, что приводит, как видно из рис. 6.13, к уменьшению величины усадки в три раза. Точно так же при одинаковой прочности бетонная смесь с низкой удобоукладываемостью содержит больше заполнителя, чем смесь с заполнителем тех же размеров, но с более высокой удобоукладываемостью, а поэтому характеризуется меньшей усадкой. Например, увеличение количества заполнителя в бетоне с 71 до 74% при

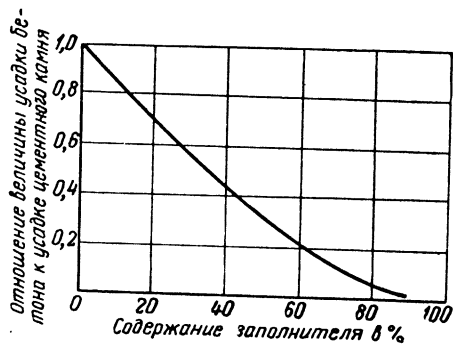


Рис. 6.13. Влияние содержания заполнителя в бетоне (по объему) на величину отношения усадки бетона к усадке цементного камня

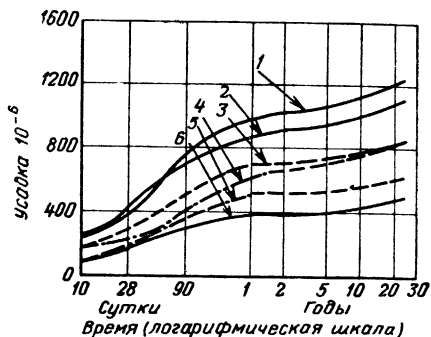


Рис. 6.14. Усадка бетона на различных заполнителях при твердении на воздухе в условиях 50% относительной влажности при 20°С. Время дано с момента окончания влажного твердения в возрасте 28 суток

1 — песок; 2 — гравий; 3 — базальт; 4 — гранит; 5 — известняк; 6 — кварц

одинаковом В/Ц позволяет снизить величину усадки примерно на 20% (рис. 6.13).

Упругие свойства заполнителя также определяют степень сокращения объема бетона. Например, использование заполнителей из металла приводит к снижению величины усадки на  $\frac{1}{3}$ , а керамзита увеличивает на  $\frac{1}{3}$  по сравнению с бетоном на обычном заполнителе. Напротив, содержание в заполнителе глинистых примесей может привести к увеличению усадки бетона на 70%, поскольку глина сама подвержена усадке.

Однако и для бетона на обычных заполнителях наблюдаются значительные колебания в величинах усадки (рис. 6.14); в общем усадка изменяется в обратной зависимости от модуля упругости бетона в раннем возрасте.

Содержание воды в бетоне также оказывает влияние на его усадку в той степени, в которой оно уменьшает содержание заполнителей, препятствующих усадке. Зависимость усадки бетона от его водосодержания подчиняется закону, представленному на рис. 6.15, однако количество воды в момент затворения не является главным фактором.

Свойства цемента оказывают незначительное влияние на усадку бетона. Швайде показал, что более высокая величина усадки чистого

цементного камня не обязательно обуславливает высокую усадку бетона на этом цементе.

Химический состав цемента, как правило, не оказывает влияния на усадку, за исключением тех случаев, когда в цементе содержится недостаточное количество гипса, что приводит к увеличению усадки бетона.

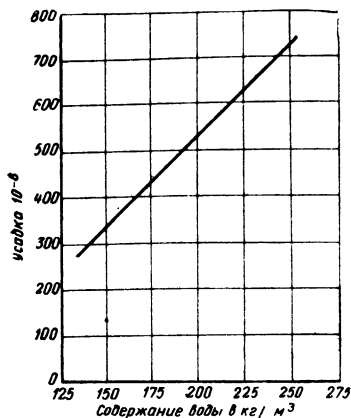


Рис. 6.15. Соотношение между содержанием воды в бетонной смеси и усадкой бетона при высыхивании

Бетоны на глинозёмистом цементе характеризуются теми же значениями величины усадки, что и бетоны на портландцементе, однако во времени процесс усадки протекает в них более быстро.

Тонкость помола цемента влияет на усадку только в случае содержания частиц крупнее, чем отверстия сита № 200. Эти частицы гидратируются очень медленно и оказывают удерживающее действие аналогичное заполнителю. В противоположность более ранним утверждениям цемент более тонкого помола не увеличивает усадку бетона. В то же время усадка цементного теста увеличивается.

Введение в бетон воздухововлекающих добавок не приводит к изменению его усадки.

Бетоны с добавкой хлористого кальция характеризуются увеличением усадки на 10—50%, возможно вследствие образования более дисперсного геля.

### **ВЛИЯНИЕ УХОДА И УСЛОВИЙ ТВЕРДЕНИЯ**

Усадка бетона протекает в течение длительных периодов времени (рис. 6.16). Некоторыми исследователями усадка наблюдалась в течение 28 лет, однако часть этой усадки происходит за счет карбонизации. Рост усадки бетона сравнительно быстро уменьшается во времени: от 14 до 34% от общей величины усадки за 20 лет протекает в течение двух недель; от 40 до 80% от общей величины усадки за 20 лет протекает в течение трех месяцев; от 66 до 85% от общей величины усадки за 20 лет протекает в течение года.

Длительное хранение бетона во влажных условиях замедляет усадку, однако влияние такого режима твердения на величину усадки невелико. При длительном твердении чистого цементного камня большое количество цемента гидратируется полностью, поэтому остается меньшее количество негидратированных зерен цемента, уменьшающих усадку, т. е. такое твердение приводит к увеличению усадки цементного камня. Цементный камень набирает прочность во времени, поэтому

усадка, как правило, протекает без образования трещин. Если трещины все-таки образуются, например вокруг частиц заполнителя, то величина общей усадки, замеренная на бетонных образцах, заметно снижается.

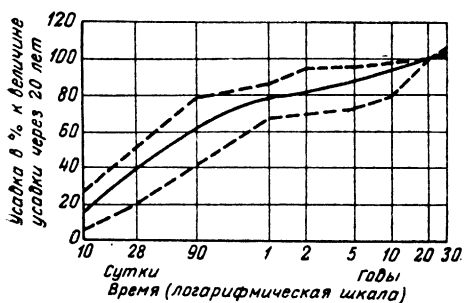


Рис. 6.16. Кривые усадка — время для бетонов различного состава при твердении в условиях 50% - и 70% -ной относительной влажности воздуха (указаны кривые верхней, средней и нижней границы)

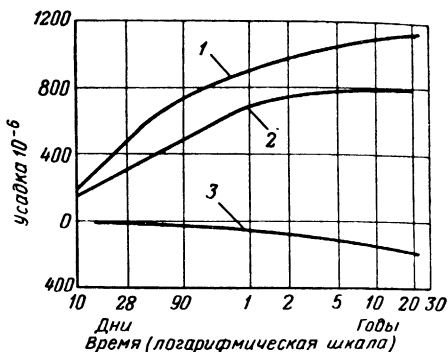


Рис. 6.17. Зависимость между усадкой и временем твердения для бетонов, твердевших при различной относительной влажности воздуха. Время дано с момента окончания влажного твердения в возрасте 28 суток

относительная влажность: 1 — 50%; 2 — 70%; 3 — 100%

Усадка хорошо выдержанного бетона протекает быстрее и, следовательно, релаксация усадочных напряжений за счет ползучести меньше. Кроме того, такой бетон обладает большой прочностью и меньшей ползучестью. Большая скорость усадки и меньшая ползучесть могут привести к образованию трещин, несмотря на более высокую прочность бетона при растяжении. Этим могут быть объяснены противоречивые результаты влияния длительности твердения на усадку бетона. Как правило, все же продолжительность периода твердения не является фактором, определяющим усадку.

Величина усадки не зависит от интенсивности высушивания бетона, за исключением тех случаев, когда бетон непосредственно из воды переносится в среду с очень низкой влажностью, что может привести к образованию трещин. Быстрое высыхание не дает возможности релаксации усадочных напряжений и может привести к еще большему трещинообразованию.

Относительная влажность окружающей среды, как видно из рис. 6.17, значительно влияет на усадку бетона. Рис. 6.17 иллюстрирует тот факт, что значение абсолютных величин усадки значительно больше величин набухания в воде: набухание в воде примерно в шесть раз меньше, чем усадка на воздухе при относительной влажности 70%, и в восемь раз, чем на воздухе при относительной влажности 50%.

Таким образом, бетон, хранящийся в сухих условиях, претерпевает усадку, но набухает в воде или атмосфере со 100%-ной влажностью.

Это указывает на то, что парциальное давление паров внутри цементного камня всегда меньше, чем давление насыщенного водяного пара, и логично предположить, что существует промежуточная влажность, при которой материал будет находиться в гигроскопическом равновесии. Действительно, Лорман установил, что такая влажность составляет 94%. Однако практически равновесие возможно только в небольших образцах.

Определение усадки согласно BS 1881 : 1952 проводят на образцах, высушенных до постоянной длины при 50°С и 17%-ной относительной влажности воздуха. Усадка, полученная при таких условиях, равна усадке бетона при длительной выдержке на воздухе с относительной влажностью примерно 65%.

Согласно BS 2028 : 1953 величина максимальной усадки для блоков заводского изготовления регламентируется в следующих пределах:

$400 \times 10^{-6}$	для элементов из бетона на тяжелом заполнителе
$600 \times 10^{-6}$	для несущих элементов из легкого бетона
$800 \times 10^{-6}$	для ненесущих » » » »

Более высокий предел деформации легкого бетона обусловлен его более высокой усадкой; для сборных изделий заводского изготовления он может быть снижен высушиванием бетона в процессе изготовления<sup>1</sup>.

### ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ УСАДКА

Кроме внутренних ограничений усадки со стороны заполнителя и арматуры возникает ограничение также из-за неоднородности протекания усадки в теле самих бетонных элементов. Потеря влаги со стороны поверхности происходит таким образом, что внутри образца устанавливается градиент влажности, вызывающий неоднородную усадку. Такая усадка компенсируется деформациями вследствие внутренних напряжений: растягивающих на поверхности бетона и сжимающих внутри него. При несимметричном высушивании образцов наблюдается их коробление.

Процесс усадки медленно развивается от высыхающей поверхности в глубь бетона. Через месяц глубина высыхания бетона достигает 8 см, а к 10 годам — только 60 см. Росс установил, что разница между усадкой на поверхности плит из цементного раствора и на глубине 15 см достигает через 200 суток величины  $470 \times 10^{-6}$ . При модуле упругости раствора  $21 \times 10^{-4}$  кгс/см<sup>2</sup> такая разница приводит к возникновению напряжений величиной 98 кгс/см<sup>2</sup>. Поскольку эти напряжения растут постепенно, они успевают вследствие ползучести релаксироваться, однако поверхностные трещины при этом все-таки могут образовываться. Увеличение количества заполнителей в бетоне значительно сдерживает и уменьшает усадку, и технические преимущества применения бетона вместо раствора или чистого цементного теста очевидны.

<sup>1</sup> Высушивание бетона допустимо только после завершения основных процессов твердения, т. е. приобретения бетоном проектных свойств — прочности, водонепроницаемости, морозостойкости. (Прим. ред.)

Так как высыхание бетона происходит с его поверхности, величина усадки зависит от формы и размеров образца, являясь функцией модуля его поверхности (отношение поверхность : объем), так что для практических целей усадка не может рассматриваться как свойство бетона, не зависящее от его размеров.

Влияние размеров образца на изменение его объема происходит также вследствие карбонизации бетона, которая особенно сказывается на образцах малых размеров.

## **ВЛАЖНОСТНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ**

Бетонные образцы, которые длительно хранились в условиях определенной относительной влажности и затем были помещены в воду или условиях более высокой влажности, претерпевают деформации набухания. Однако даже при длительном хранении в воде деформации набухания не достигают величин первоначальной усадки бетона. Для бетона величина необратимой части деформации составляет от 0,3 до 0,6 от величины общей усадки. Более часто встречаются низкие значения.

Необратимость усадки, очевидно, связана с образованием дополнительных структурных связей в цементном геле за счет установления более плотного контакта между его частицами при высушивании. Поэтому если гидратация цементного клинкера произошла в значительной степени до высушивания цементного камня, может образоваться меньшее количество таких связей. Действительно, эксперименты, проведенные на образцах из цементного теста, которые твердели в воде в течение шести месяцев и затем были подвергнуты высушиванию, показали отсутствие необратимой части усадки при повторном увлажнении.

Если высушивание бетона сопровождается также его карбонизацией, цементный камень становится нечувствительным к изменениям влажности и наблюдается увеличение необратимой части усадки.

Влияние на влажностные деформации бетона условий твердения до высушивания, а также карбонизации позволяет объяснить наблюдаемые расхождения и наличие сложных зависимостей между усадкой и деформациями во влажных условиях.

На рис. 6.18 показаны влажностные деформации образцов из цементного камня, которые подвергались попеременному хранению в во-

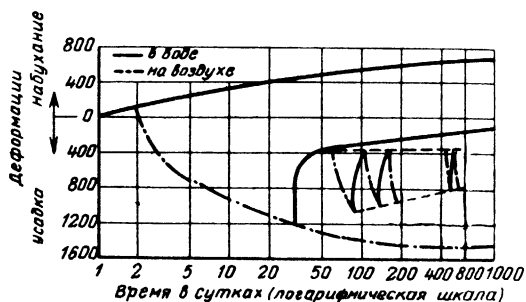


Рис. 6.18. Влажностные деформации цементно-базальтового раствора состава 1:1 при попеременном твердении в воде и на воздухе с 50% относительной влажностью. Продолжительность цикла 28 суток

де и на воздухе с относительной влажностью 50%. Величина влажностных деформаций зависит от влажности окружающей среды и состава бетона. Влажностные деформации легкого бетона больше, чем у бетона на тяжелом заполнителе.

Для бетона постепенное уменьшение деформаций в течение повторяющихся циклов, очевидно, обусловлено образованием дополнительных связей.

Величины влажностных деформаций раствора и бетона, высушенных при 50°С и погруженных в воду следующие.

Состав смеси по весу	Деформации $\times 10^{-6}$
Цементный камень . . . . .	1000
Раствор 1:1 . . . . .	400
» 1:2 . . . . .	300
» 1:3 . . . . .	200
Бетон 1:2:4 . . . . .	300

Если период хранения в воде достаточно продолжителен, то дополнительная гидратация цемента приводит к некоторому набуханию, которое накладывается на обратимые деформации, обусловленные попеременным увлажнением и высушиванием. На рис. 6.18 этот процесс нашел отражение в некотором подъеме верхней пунктирной линии.

При изготовлении предварительно напряженных элементов, по предложению Росса, могут быть использованы свойства увеличения размеров бетона при влажном хранении. По этому предложению, которое применимо только для конструкций малых размеров, бетон до отпуса натяжения арматуры высушивается, а затем, после предварительного напряжения конструкция хранится во влажных условиях. При этом развивающиеся деформации набухания накладываются и поглощают сокращение размеров бетона за счет ползучести от натяжения арматуры. По такой технологии изготавливается «малоосадочный и слабоползучий» бетон.

### **УСАДКА ЗА СЧЕТ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА**

Кроме усадки при высыхании бетон подвергается усадке за счет карбонизации. Это явление было обнаружено только в последнее время и в большинстве имеющихся экспериментальных данных по усадке, величина усадки при высыхании включает в себя и усадку при карбонизации бетона. Однако природа усадки при карбонизации и высыхании совершенно различна.

Углекислый газ  $\text{CO}_2$ , имеющийся в атмосфере, в присутствии влаги вступает во взаимодействие с продуктами гидратации клинкерных минералов. Это взаимодействие происходит даже при малых концентрациях  $\text{CO}_2$  в атмосфере, где парциальное давление  $\text{CO}_2$  около  $3 \times 10^{-4}$  атмосферы; в непрветриваемой лаборатории парциальное давление может составлять до  $12 \times 10^{-4}$  ат. Степень карбонизации увеличивается с увеличением концентрации  $\text{CO}_2$  в воздухе.

В присутствии  $\text{CO}_2$  карбонизируется  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  бетона до  $\text{CaCO}_3$ , в такие же реакции вступают и некоторые другие продукты гидратации це-

мента. Эти реакции могут протекать при низких концентрациях  $\text{CO}_2$  в атмосфере, однако глубина карбонизации незначительна и медленно увеличивается во времени.

Степень карбонизации легко определяется при обработке свежего излома бетона фенолфталеином, при этом  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  приобретает малиновый цвет, в то время как карбонизованный участок бетона не окрашивается. Степень карбонизации зависит также от влажности бетона и относительной влажности окружающей среды. Размер образцов тоже влияет на карбонизацию. Это связано с тем, что влага, образующаяся, в результате взаимодействия  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с  $\text{CO}_2$ , стремится диффундировать в атмосферу с тем, чтобы установилось равновесие внутри образцов. Если диффузия протекает медленно, то давление пара в бетоне увеличивается до состояния насыщения и проникание  $\text{CO}_2$  в образец приостанавливается.

Карбонизация сопровождается увеличением веса и усадкой бетона, которая при карбонизации вызывается растворением кристаллов  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  под действием сжимающих напряжений (вызванных действием усадки при высушивании) и отложением  $\text{CaCO}_3$  в ненапряженных объемах.

На рис. 6.19 приведены кривые усадки при высушивании растворных образцов, хранившихся в атмосфере, свободной от  $\text{CO}_2$ , но с различной влажностью, а также кривые усадки под действием последующей карбонизации. Как видно из приведенных графических зависимостей, карбонизация приводит к увеличению усадки при значениях относительной влажности воздуха, от 100% до 25%. В последнем случае в поровом пространстве цементного камня содержится недостаточно влаги для образования из  $\text{CO}_2$  угольной кислоты. При 100% влажности поры бетона заполнены водой, и диффузия  $\text{CO}_2$  в цементный камень протекает очень медленно; возможно также, что диффузия ионов кальция из цементного камня приводит к образованию  $\text{CaCO}_3$  с последующей кольматацией пор, расположенных в поверхностном слое.

Последовательность протекания процессов высушивания и карбонизации в значительной степени влияет на величину общей усадки.

Одновременное высушивание и карбонизация приводит к меньшей

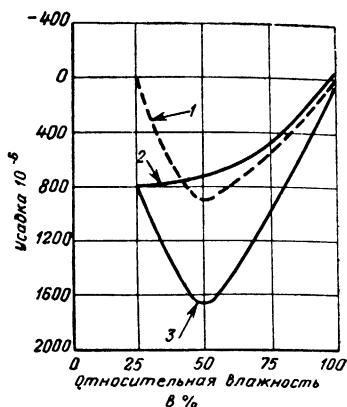


Рис. 6.19. Усадка при высушивании и усадка при карбонизации бетона при различной влажности воздуха

усадка: 1 — при карбонизации; 2 — при высушивании; 3 — суммарная

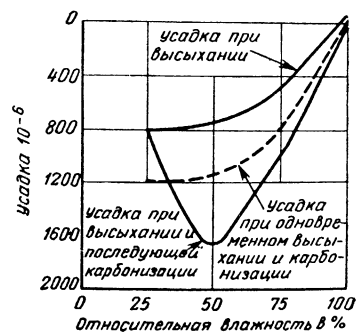


Рис. 6.20. Влияние высушивания и карбонизации на усадку

усадке, чем в случае, когда карбонизация происходит после высыхания (рис. 6.20), так как в первом случае большая часть процесса карбонизации идет при относительной влажности больше 50%, а при этих условиях усадка за счет карбонизации бетона автоклавного твердения очень мала.

В случае, когда бетон подвергается попеременному увлажнению и высушиванию в атмосфере, содержащей  $\text{CO}_2$ , усадка, обусловленная карбонизацией (в цикле высыхания), становится значительно более заметной. При этом в любой стадии усадка больше, чем в атмосфере, не содержащей  $\text{CO}_2$ , поскольку карбонизация увеличивает величину необратимой ее части и может способствовать образованию трещин в бетоне.

Карбонизация бетона, предшествующая испытаниям при переменном увлажнении и высушивании, уменьшает влажностные деформации иногда наполовину. Это обстоятельство используется в практических целях путем предварительной карбонизации элементов заводского изготовления, проводимой сразу после распалубки. В этом случае при строгом соблюдении влажностных условий при карбонизации получают бетон с малыми величинами влажностных деформаций.

Карбонизация бетона приводит также к увеличению его прочности и снижению проницаемости вследствие того, что вода, выделяющаяся при карбонизации, способствует гидратации, а  $\text{CaCO}_3$  уплотняет цементный камень.

### **ПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНА**

Известно, что зависимость между напряжением и деформациями бетона является функцией времени: постепенное увеличение деформаций во времени обусловлено ползучестью. Ползучесть бетона, следовательно, может быть определена как увеличение деформации при постоянной нагрузке. Деформации ползучести могут в несколько раз превосходить деформации от нагрузки, поэтому изучение и учет ползучести имеет важное значение в строительной механике.

С другой стороны, если бетонный образец подвергается действию постоянной деформации, то ползучесть может быть определена как уменьшение напряжений во времени. Такая форма ползучести или релаксация напряжений показана на рис. 6. 21.

Для характеристики явления ползучести, исходя из различного понимания природы явления, употреблялось множество терминов, таких, как течение, пластическое течение, пластическая деформация и др. В настоящее время общепринятым термином для обозначения роста деформаций во времени под постоянной нагрузкой является «ползучесть».

При нормальных условиях загрузки мгновенная деформация зависит от скорости нагрузки и может включать в себя кроме упругой также и часть деформации ползучести. Точное разделение мгновенной упругой деформации и начальной ползучести представляет трудную задачу, однако для практических целей такое определение мгновенной деформации является достаточно корректным.

Поскольку модуль упругости увеличивается с возрастом бетона, упругая деформация постепенно уменьшается, и, строго говоря, пол-



зучесть должна быть измерена как часть, превышающая упругую деформацию, в то время когда определяется ползучесть (рис. 6. 22). Однако при определении модуля упругости часто не учитывается возраст бетона и за деформацию ползучести принимают просто увеличение выше уровня начальной упругой деформации. Такое определение, хотя и яв-

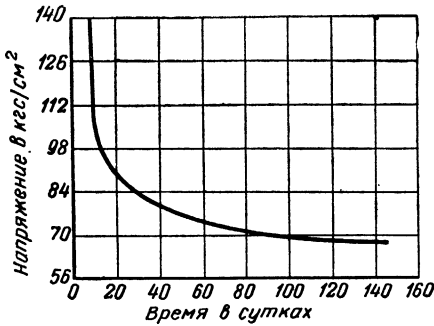


Рис. 6.21. Релаксация напряжений при постоянной деформации  $360 \times 10^{-6}$

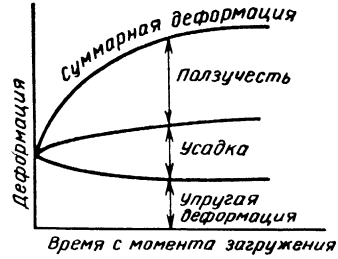


Рис. 6.22. Виды деформаций бетона, зависящие от времени, при действии постоянной нагрузки

ляется теоретически менее точным, не приводит к серьезным погрешностям и удобно для практических измерений.

Хотя большинство данных, приводимых ниже, относится к ползучести бетона при сжатии, бетон характеризуется деформацией ползучести и при действии растягивающих напряжений. Полагают, что величины ползучести при сжатии и растяжении одного порядка и влияние на них различных факторов происходит по одному механизму. Эти положения справедливы и для ползучести бетона при кручении, хотя сведения о ползучести при этом виде напряженного состояния ограничены.

Если бетон подвергается высушиванию в период нагружения, то деформации ползучести и усадки накладываются и для вычисления деформаций ползучести следует из общей деформации за время испытаний вычесть деформацию усадки, определенную в тех же условиях и за то же время на ненагруженных образцах (рис. 6.22). Это вынужденное упрощение далее показало, что ползучесть и усадка — не независимые явления.

При мгновенном снятии нагрузки деформации бетона мгновенно уменьшаются на величину, эквивалентную упругой деформации, харак-

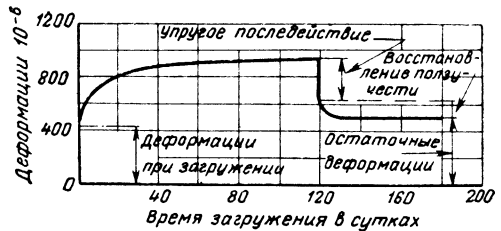


Рис. 6.23. Ползучесть и упругое последствие образцов цементного раствора при испытаниях в условиях 95% относительной влажности воздуха под нагрузкой  $150 \text{ кгс/см}^2$  и затем разгруженных

терной для бетона рассматриваемого возраста. Величина этой деформации обычно меньше деформации при загрузении бетона. За этим упругим последствием следует постепенное уменьшение деформации, называемое восстанавливаемостью деформации ползучести (рис. 6.23). Форма кривой восстанавливаемости аналогична кривой ползучести, но достигает максимума быстрее. Ползучесть бетона характеризуется неполной обратимостью.

### **ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНА**

В большинстве исследований ползучесть изучалась эмпирически с целью выявления ее зависимости от различных свойств бетона. Сложность в интерпретации большинства имеющихся данных состоит в том, что трудно отделить влияние одного свойства бетона от других. Однако влияние основных факторов на ползучесть бетона удалось установить.

Одним из основных факторов, влияющих на ползучесть бетона, является относительная влажность окружающей среды. Для бетона определенного, рассматриваемого состава ползучесть увеличивается с уменьшением относительной влажности. Это отчетливо прослеживается на рис. 6.24, где приведены кривые ползучести бетонных образцов, твердевших при 100% -относительной влажности и затем загруженных и выдерживаемых при различной влажности. Эти условия испытаний приводят к значительному расхождению в значениях величин усадки образцов в начальные периоды времени после загрузки. Интенсивность роста

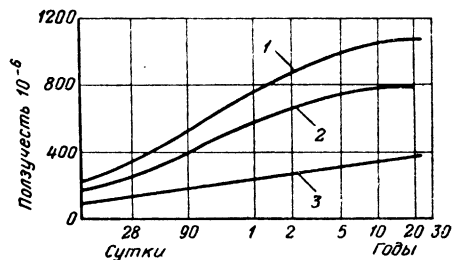


Рис. 6.24. Ползучесть бетона, твердевшего во влажных условиях 28 сут., затем загруженного и твердевшего при различной относительной влажности

относительная влажность: 1 — 50%; 2 — 70%;  
3 — 100%

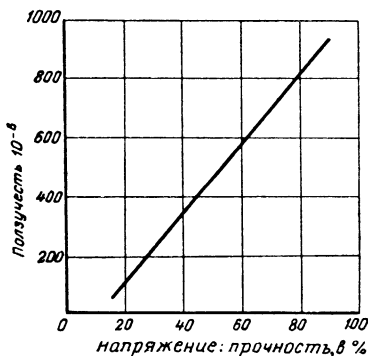


Рис. 6.25. Ползучесть образцов цементного раствора при твердении и длительном хранении в условиях различной относительной влажности

деформаций ползучести образцов, испытываемых при различных условиях, также соответственно отличается в начальные сроки испытаний, однако в более позднем возрасте становится близкой для образцов различных серий испытаний (рис. 6.24).

Возможно, это связано с тем, что высушивание образцов приводит к увеличению ползучести бетона в раннем возрасте, в случае же, когда устанавливается влажностное равновесие между средой и бетоном еще

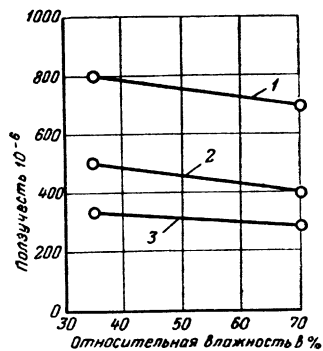


Рис. 6.26. Влияние относительной влажности воздуха на ползучесть бетона, загруженного в различном возрасте  
возраст после загрузки: 1 — 28 сут.; 2 — 90 сут.; 3 — 360 сут.

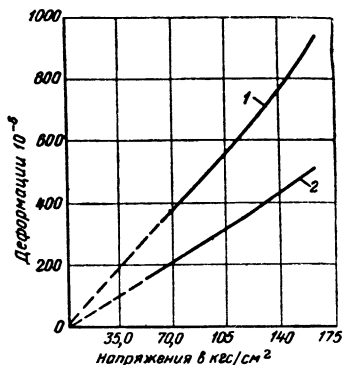


Рис. 6.27. Зависимость между начальными напряжениями и набуханием в воде (2) и остаточными деформациями бетона (1)

до загрузки образцов, влияние относительной влажности окружающего воздуха сказывается в меньшей степени или не сказывается вовсе (рис. 6.25). Отсюда следует, что при загрузке отвердевшего бетона влияние относительной влажности окружающей среды на ползучесть незначительно (рис. 6.26).

Лермит предлагает выражать зависимость ползучести бетона от его высыхания выражением вида

$$\epsilon_n = \epsilon_n^i (1 + K\epsilon_y),$$

где  $\epsilon_n^i$  — деформация ползучести в условиях отсутствия усадки бетона;  $\epsilon_y$  — деформация усадки при заданной относительной влажности;  $K$  — константа, зависящая от вида бетона.

Бетон, который имеет высокую усадку обычно характеризуется и высокой ползучестью. Это не означает, что эти два явления протекают по одному механизму, однако они связаны с одинаковыми свойствами структуры гидратированного цементного камня. Не следует забывать, что бетон, твердевший и загруженный при постоянной относительной влажности, характеризуется ползучестью, которая не вызывает потерю воды из бетона в окружающую среду; при разгрузке бетона восстановление деформации ползучести не сопровождается увеличением веса<sup>1</sup> образцов.

<sup>1</sup> Некоторое увеличение веса бетона во время ползучести или восстановления деформаций при разгрузке может вызываться карбонизацией.

На рис. 6.27 приведены кривые, иллюстрирующие связь между ползучестью и усадкой бетона. Образцы, загруженные в течение 600 суток, были разгружены и после восстановления деформации ползучести погружены в воду. При этом величина набухания в воде оказалась пропорциональной напряжениям, которые были сняты около двух лет назад. Остаточные деформации после набухания подчиняются той же пропорциональной зависимости.

На рис. 6.28 показано изменение деформаций загруженных образцов при переменном хранении в воде и на воздухе с относительной влаж-

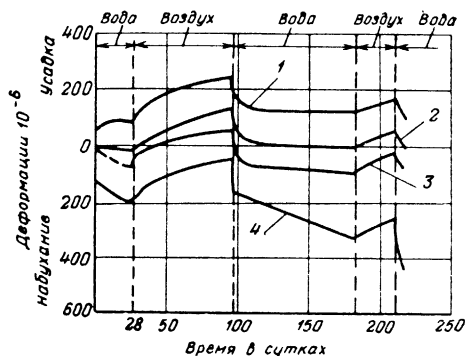


Рис. 6.28. Деформации бетона под действием различных по величине напряжений и при переменном хранении в воде и на воздухе с относительной влажностью 50%

нагрузка: 1 — 150 кгс/см<sup>2</sup>; 2 — 100 кгс/см<sup>2</sup>; 3 — 50 кгс/см<sup>2</sup>; 4 — 0

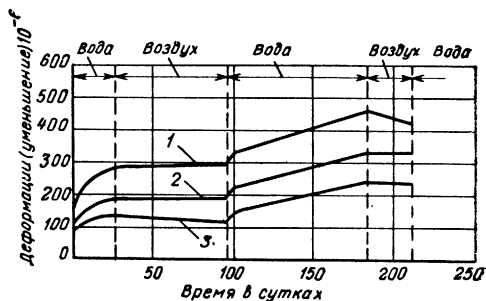


Рис. 6.29. Деформации нагруженных образцов по рис. 6.28 относительно деформаций незагруженных образцов

нагрузка: 1 — 150 кгс/см<sup>2</sup>; 2 — 100 кгс/см<sup>2</sup>; 3 — 50 кгс/см<sup>2</sup>

ностью 50%. Как видно из приведенных кривых, деформации ползучести образцов в воде зависят от величины набухания ненагруженных образцов; на воздухе характер изменения деформаций всех образцов одинаков. Увеличение деформации ползучести при погружении в воду старого бетона, очевидно, связано с разрывом некоторых связей, образовавшихся в период высыхания цементного камня. На рис. 6.29 приведены кривые, полученные на основе данных рис. 6.28, деформации которого отнесены к деформациям ненагруженных образцов. Из этих данных может быть сделан практический вывод, что попеременное увлажнение и высушивание бетона увеличивает величину деформации ползучести, т. е. результаты лабораторных испытаний не позволяют точно определить величину деформации ползучести в условиях эксплуатации конструкции.

Таким образом, ползучесть и усадка не являются слагаемыми одного процесса, однако часто бывает удобно рассматривать общую деформацию образцов, хранящихся при постоянной относительной влажности. Величина этой деформации пропорциональна приложенной

нагрузке, за исключением случаев, при которых напряжения близки или равны 0, когда деформация по величине равна усадке.

По Лермиту, усадка бетона вызывает возникновение внутренних напряжений, которые компенсируют напряжения при приложении внешней нагрузки, т. е. ниже определенного уровня нагрузки ползучесть не выше чем усадка ненагруженных образцов.

Во многих исследованиях установлена пропорциональная зависимость между деформацией ползучести и величиной приложенных напряжений. Это положение справедливо при условии, что напряжения составляют не более половины начальной прочности бетона. Однако откло-

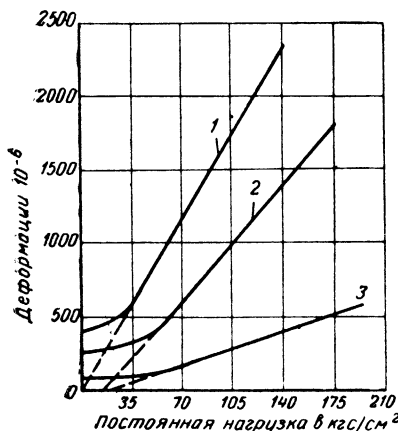


Рис. 6.30. Деформации ползучести и усадки бетона при испытаниях на воздухе

время под нагрузкой: 1 — 1000 сут.; 2 — 100 сут.; 3 — 10 сут.

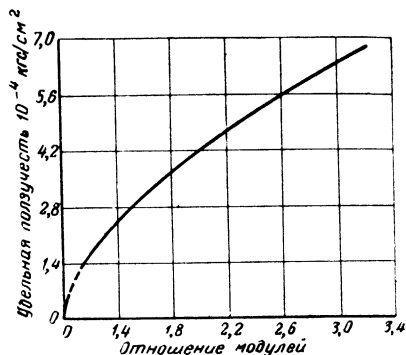


Рис. 6.31. Соотношение ползучести в момент времени  $t$  и величины отношения модуля упругости бетона в тот же момент времени  $t$  к модулю упругости в момент приложения нагрузки. Переменные — состав бетона, возраст в момент нагружения, продолжительность нагружения

нения от пропорциональной зависимости становятся значительными только при очень высоких уровнях напряжения.

Прочность бетона влияет в значительной степени на ползучесть бетона: в широком диапазоне значений ползучесть пропорциональна прочности бетона в момент приложения нагрузки. В соответствии с этим ползучесть бетона может быть связана линейной зависимостью с величиной отношения напряжения: прочность бетона (см. рис. 6.25). Поскольку для бетона заданного состава прочность и модуль упругости пропорциональны друг другу, ползучесть и модуль упругости также связаны пропорциональной зависимостью. На рис. 6.31 приведены экспериментальные значения ползучести бетона за время  $t$  в зависимости от величины отношения модуля упругости бетона в момент времени  $t$  к модулю упругости в момент приложения нагрузки. Испытания проводились для бетона определенного состава, возраст бетона в момент приложения нагрузки и в момент измерения ползучести изменялся в широких пределах. Величина модуля упругости в момент приложения на-

грузки позволяет косвенно судить о прочности бетона в это время, а увеличение модуля — о продолжительности нагружения.

Из установленного факта влияния прочности бетона на его ползучесть следует, что ползучесть зависит в сильной степени от  $V/C$  смеси однако соотношение других компонентов смеси (рис. 6.32) для обычно применяемых бетонов влияет на ползучесть незначительно, хотя послед-

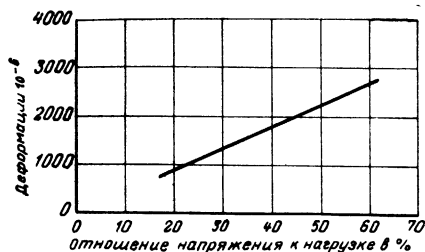


Рис. 6.32. Деформации бетонов (с различным соотношением цемент—заполнитель) под постоянной нагрузкой в течение 100 сут.

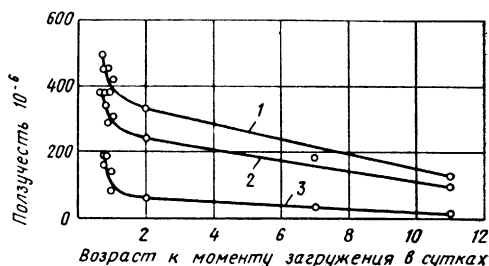


Рис. 6.34. Влияние возраста бетона в момент загрузки на ползучесть бетона на глиноземистом цементе  
время под нагрузкой: 1 — 100 сут.; 2 — 20 сут.; 3 — 1 сут.

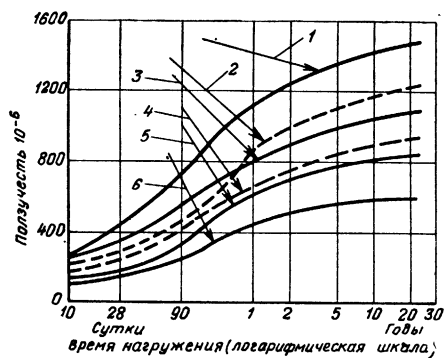


Рис. 6.33. Ползучесть бетонов на различных заполнителях, загруженных в возрасте 28 сут., при испытаниях на воздухе с относительной влажностью 50% при 20° С

1 — песчаник; 2 — базальт; 3 — гравий; 4 — гранит; 5 — кварц; 6 — известняк

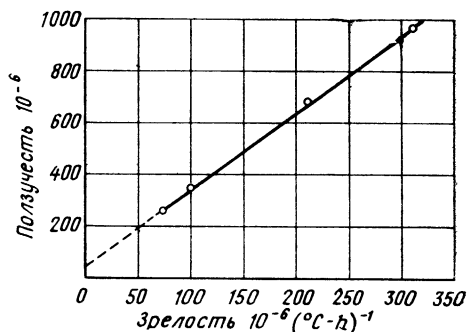


Рис. 6.35. Влияние зрелости бетона, загруженного в возрасте 7 сут., на величину ползучести после 420 сут. под нагрузкой

ними исследованиями установлено, что заполнитель сдерживает ползучесть так же, как и усадку. Вне сомнения, модуль упругости заполнителя влияет на величину деформации ползучести, которая может быть реализована при нагружении бетона, и, как следует из рис. 6.33, бетоны на различных заполнителях характеризуются различными величинами деформации ползучести.

Возраст бетона в момент приложения нагрузки также сильно влияет на величину ползучести (рис. 6.34), причем влияние возраста ска-

зывается сильнее, чем увеличение прочности бетона со временем. По этой же причине ползучесть бетона зависит от его зрелости в соответствии с графической зависимостью, приведенной на рис. 6.35. Влияние вида цемента на ползучесть бетона сказывается в той мере, в какой вид цемента влияет на прочность бетона в момент загрузки. При сравнении величин ползучести бетона на различном связующем следует принимать во внимание зависимость прочности бетона в раннем возрасте от вида цемента. Поэтому величина ползучести бетона на портландцементе различных видов и на глиноземистом цементе примерно одинакова. Это относится к ползучести как на воздухе, так и в воде (рис. 6.36). Исключение составляет шлакопортландцемент, бетон на котором обладает большей ползучестью, чем на стандартных видах портландцемента.

Тонкость помола цемента влияет на рост прочности бетона в раннем возрасте и таким образом влияет на его ползучесть. Однако прямого влияния тонкости помола на увеличение ползучести не установлено, имеется множество противоречивых данных, которые могут быть объяснены косвенным влиянием гипса. Известно, что чем больше тонкость помола цемента, тем больше требуемое количество гипса. Поэтому дополнительный помол цемента в лабораторных условиях без добавления гипса приводит к получению неправильно отрегулированного по срокам схватывания цемента, который показывает более высокую усадку и ползучесть.

Многими испытаниями обнаружено, что ползучесть бетона уменьшается с увеличением размеров образцов. Это может быть обусловлено влиянием усадки, а также тем обстоятельством, что на поверхности ползучесть протекает в условиях высыхания и величина ее выше, чем в теле образца. Если со временем образец высохнет на всю глубину, этот процесс будет сопровождаться ростом его прочности, что приведет к снижению ползучести.

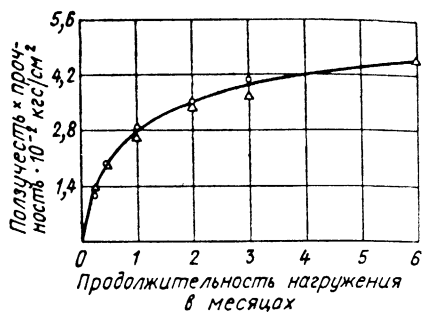


Рис. 6.36. Ползучесть бетона на глиноземистом цементе при хранении в воде и на воздухе в зависимости от прочности

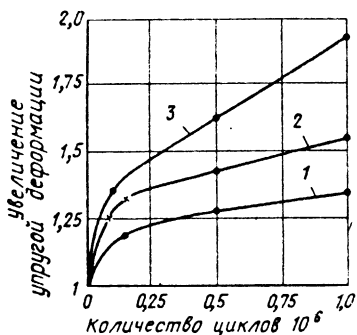


Рис. 6.37. Увеличение деформаций при циклическом нагружении со скоростью 500 циклов в минуту. Цифры в кружках указывают продолжительность действия постоянной нагрузки (в сутках), после которой достигнута одинаковая деформация

1 — напряжение в долях от предела прочности 0,15; 2 — то же, 0,22; 3 — то же, 0,30

При повышении температуры выше нормальной ползучесть бетона увеличивается. Более высокая температура приводит к увеличению начальной скорости ползучести по сравнению с бетоном, испытываемым при нормальной (комнатной) температуре. Это обусловлено увеличением подвижности воды и активацией процесса деформирования. Однако рост ползучести со временем прекращается и становится одинаковым для всех температур. В случае испытаний бетона в раннем возрасте ползучесть при  $90^{\circ}\text{C}$  в три раза выше ползучести при  $20^{\circ}\text{C}$ .

Все данные по ползучести получены в основном при испытании бетона под постоянной нагрузкой. Бетон, подвергающийся циклическому нагружению и разгрузению, также показывает прогрессирующий рост доформаций (рис. 6.37). Однако при испытании образцов, нагруженных вначале длительно действующей постоянной нагрузкой, а затем циклической нагрузкой, было обнаружено только незначительное увеличение деформаций по сравнению с их уровнем, полученным при действии постоянной нагрузки.

### **ПОЛЗУЧЕСТЬ ВО ВРЕМЕНИ**

Ползучесть бетона обычно определяется изменением деформаций образцов во времени под действием постоянной нагрузки и в определенных условиях. Испытательная установка, обеспечивающая правильное проведение эксперимента, показана на рис. 6.38. Постоянство действия нагрузки на образец, уменьшающийся в размерах, обеспечивается пружиной.

При таких условиях ползучесть протекает в течение очень длительного времени; имеются данные, свидетельствующие, что незначительное увеличение деформаций может быть даже через 30 лет (рис. 6.39). Интенсивность роста ползучести, однако, со временем уменьшается и через некоторое время ползучесть носит установившийся характер.

Из данных, приводимых Трокселом, Рафаэлем и Дэвисом и представленных на рис. 6.39, следует, что:

от 18 до 35% (в среднем 26%) от величины ползучести за 20 лет протекает в течение двух недель;

от 40 до 70% (в среднем 55%) — в течение трех месяцев;

от 64 до 83% (в среднем 76%) — в течение одного года.

Если величину ползучести через один год загрузки принять за единицу, тогда средние величины ползучести за последующие годы могут быть выражены следующими величинами:

1,14 через 2 года  
1,2 через 5 лет  
1,26 через 10 »  
1,33 через 20 »  
1,36 через 30 »

Эти данные показывают, что величина конечной ползучести в 1,36 раз больше ползучести через один год; в практических расчетах часто принимают, что окончательная ползучесть равна  $4/3$  от ползучести бетона через один год действия нагрузки. При этом для бетона, нагружен-



ного в раннем возрасте, погрешность составляет  $\pm 15\%$ . Расчет величины окончательной ползучести по данным испытаний менее одного года затруднителен и неточен; например, ползучесть бетона через 20 лет действия нагрузки в 1,5—3 раза больше ползучести через  $2\frac{1}{2}$  месяца загрузения.

Для выражения зависимости ползучести от времени действия нагрузки предложены многочисленные математические выражения. Одним из наиболее удобных является гиперболическая функция, предложенная Россом и Лорманом.

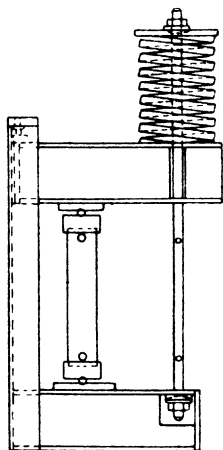


Рис. 6.38. Установка для определения ползучести под постоянной нагрузкой

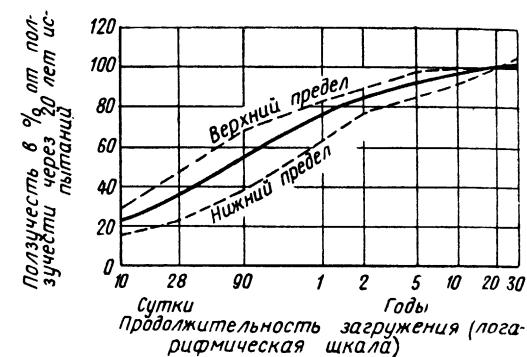


Рис. 6.39. Кривые ползучести для бетонов разного состава при хранении в условиях с различной влажностью

Росс выражает зависимость ползучести  $\epsilon_n$  от времени действия нагрузки  $t$  уравнением

$$\epsilon_n = \frac{t}{a + bt},$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные, определяемые из экспериментальных данных.

Другим выражением, полученным на основании исследований ползучести бетона для плотин, является уравнение вида

$$\epsilon_n = F(K) \log_e(t + 1),$$

где  $K$  — возраст бетона в момент загрузки;

$F(K)$  — функция, выражающая интенсивность изменения ползучести со временем;

$t$  — время действия нагрузки в сутках.

На рис. 6.40 проведено сравнение экспериментальных данных с подсчитанными величинами общей деформации  $\epsilon_0$ , т.е. деформации ползучести плюс упругие деформации  $\frac{1}{E}$  при единичном напряжении.

Скорость нарастания ползучести обычно описывается уравнением

$$\frac{d\epsilon_n}{dt} = (\epsilon_\infty - \epsilon_n) K.$$

Различные полученные зависимости ползучести от времени, будь они гиперболические, экспоненциальные и др., получены экспериментальным путем и справедливы для бетона того состава, на котором они были установлены, таким образом наши знания ползучести все еще носят качественный характер.

Общие закономерности могут быть сделаны на основе анализа и обобщения имеющихся данных и они необходимы для нужд практики. Данные для расчета и проектирования могут быть получены с помощью диаграмм Вагнера. На рис. 6.41, *a* показана конечная удельная

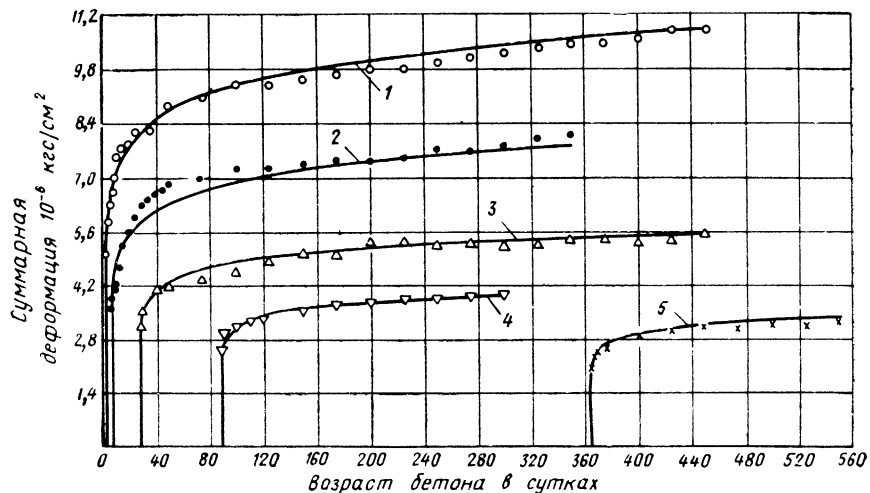


Рис. 6.40. Наблюдаемые и расчетные суммарные деформации бетона в плотине Каньон Ферри

время под нагрузкой; 1 — 2 сут.; 2 — 7 сут.; 3 — 28 сут.; 4 — 90 сут.; 5 — 365 сут.

ползучесть при различных сроках нагружения для бетона, изготовленного на обычном и быстротвердеющем цементах. Исследования проводились на образцах-цилиндрах диаметром 12 см, изготовленных из бетона с  $V/C=0,65$ , при содержании цемента 20% веса смеси, хранящегося на воздухе с относительной влажностью 70%.

Применительно к различным условиям эксплуатации величины удельной ползучести, приведенные на рис. 6.41, *a*, должны быть помножены на соответствующие коэффициенты. Значения этих коэффициентов приведены на рис. 6.41. Данные рис. 6.41, *b* позволяют учитывать влияние относительной влажности окружающей среды, 6.41, *в* — влияние  $V/C$  бетона, 6.41, *г* — содержание цемента в смеси. Результат, полученный на основе величины удельной ползучести (рис. 6.41, *a*) с введением всех поправочных коэффициентов для заданных условий эксплуатации и состава смеси, дает значение расчетной величины ползучести. Кроме этого, следует также учитывать влияние на ползучесть бетона вида заполнителя и размера конструкции.

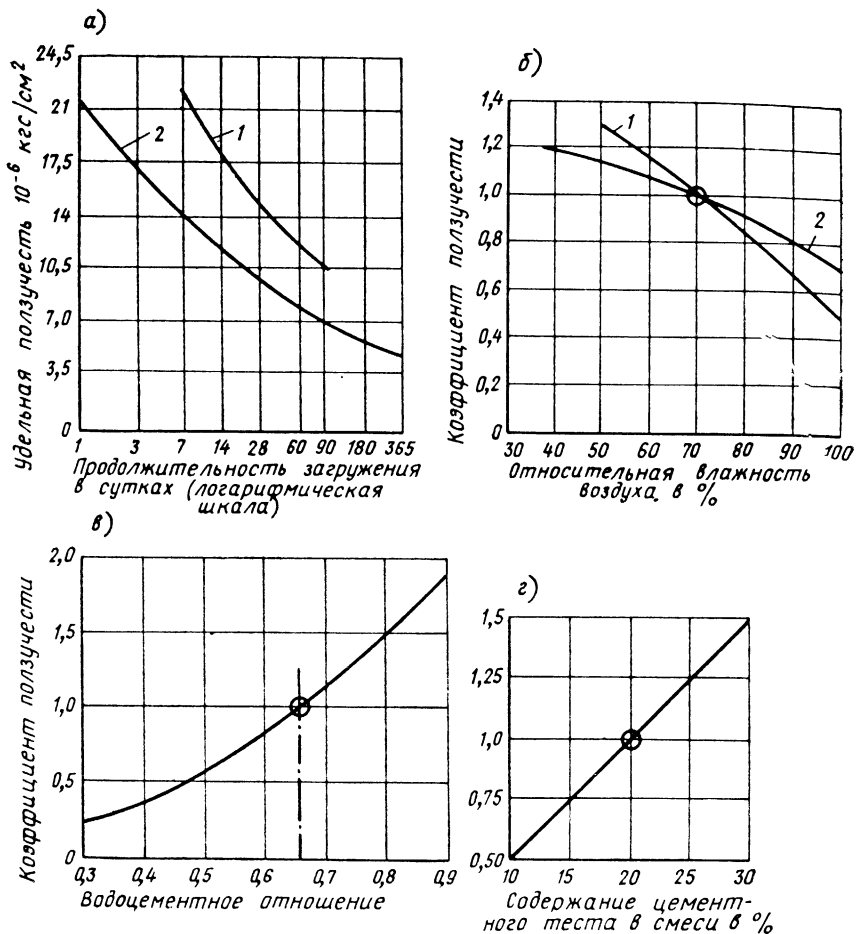


Рис. 6.41. Кривые Вагнера для расчета конечной удельной ползучести

а — влияние продолжительности загрузки на ползучесть бетона; б — влияние относительной влажности воздуха на ползучесть бетона: 1 — обычный портландцемент; 2 — быстротвердеющий; в — влияние В/Ц на ползучесть; г — влияние содержания цементного теста в бетоне на ползучесть

### ПРИРОДА ПОЛЗУЧЕСТИ

Как следует из рис. 6.23, ползучесть бетона и ее релаксация являются сходными явлениями, однако природа их недостаточно ясна. В этом отношении определенный интерес представляют две теории. Дюотрон полагает, что упругое последствие не является упругим явлением, а простым проявлением некоторого набухания цементного камня после разгрузки, когда бетон возвращается к состоянию гигрометрического равновесия с окружающей средой. По другой теории Макгенри объяс-

няет релаксацию ползучести (упругое последствие) на основе принципа суперпозиции деформации. Этот принцип основан на положении о том, что деформации, появившиеся в бетоне в отрезок времени  $t$  за счет увеличения напряжений, произошедшее во время  $t_0$ , не зависят от действия других напряжений, приложенных раньше или позже времени  $t_0$ . Под увеличением напряжений понимают как сжимающие, так и растягивающие усилия, в том числе и разгрузку образца. Из этого следует,

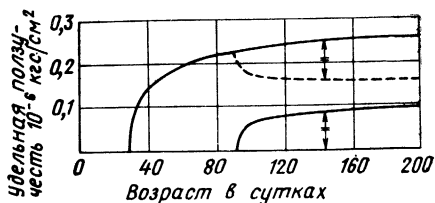


Рис. 6.42. Пример принципа суперпозиции деформаций по Макгенри

ей за какое-то время и деформацией, которая возникла бы, если образец продолжал подвергаться действию первоначальной сжимающей нагрузке.

На рис. 6.43 приведены результаты сравнения действительной и рассчитанной деформаций (рассчитанные величины получены по разнице величин двух экспериментальных кривых) для бетона, изолированного от окружающей среды (например, внутри массива). Видно, что во всех случаях действительные деформации после разгрузки выше, чем остаточные деформации, определенные на основе принципа суперпозиции. Таким образом, величина действительной релаксации ползучести меньше, чем предполагаемая. Такая же ошибка получается и при применении этого принципа к результатам испытаний образцов на действие переменных нагрузок. Принцип суперпозиции полностью не объясняет явление ползучести и упругого последствия. Тем не менее принцип суперпозиции деформаций является удобной рабочей гипотезой. По нему предполагается, что ползучесть есть упругое явление, растянутое во времени, в котором полное восстановление обычно сдерживается развивающейся гидратацией цемента. Поскольку свойства старого бетона изменяются во времени весьма незначительно, следует ожидать, что ползучесть бетона, загруженного в возрасте нескольких лет, будет полностью обратной, однако это положение экспериментально не было подтверждено.

Проблема природы ползучести является дискуссионной и не может быть освещена здесь полностью. Ползучесть в цементном камне может быть связана с внутренним движением адсорбционной или межкристаллической воды. Последними экспериментами Глюклиха показано, что бетон, из которого была удалена вся испаряемая вода, практически не проявляет ползучести.

Кроме того, возможно, что силы поверхностного натяжения накладывающих отпечаток на общую картину явления. Известно, что жидкости

коагулируют вследствие стремления их свободной поверхностной энергии к минимуму. Величина поверхностных сил зависит от площади, на которой они действуют. Под действием приложенного сжимающего усилия поверхностные силы могут удерживаться на больших площадях и, когда действие внешнего усилия будет внезапно прекращено, первоначальный объем тела не будет восстановлен. Возможно, что с увеличением возраста бетона поверхностные силы будут превалировать над упругими силами. Этому процессу в дальнейшем будут способствовать молекулярные релаксационные явления внутри твердого тела: упругая

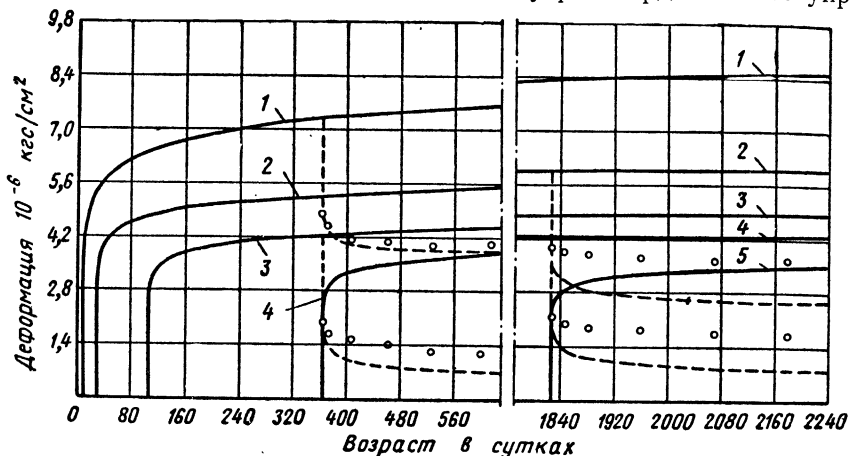


Рис. 6.43. Сравнительная оценка измеренных деформаций и рассчитанных на основе принципа суперпозиции деформаций  
время под нагрузкой: 1 — 7 сут.; 2 — 28 сут.; 3 — 105 сут.; 4 — 1 год; 5 — 5 лет

энергия будет поглощаться, и будет иметь место постоянно регулируемое равновесие вблизи поверхности контакта. По этим причинам ползучесть не является полностью обратимой.

Тесная взаимозависимость между прочностью и ползучестью цементного камня позволяет предположить, что ползучесть так же, как и прочность, зависит от относительной величины не заполненного гелем пространства в цементном камне: чем больше это пространство, тем меньше прочность и тем больше ползучесть бетона.

Точный механизм ползучести все еще неизвестен, однако очевидно что ползучесть, как и другие механические свойства цементного камня, зависит в основном от макроструктуры на уровне коллоидных размеров и только косвенно от химического состава.

### РЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Хотя механизм ползучести до конца еще не ясен, ее частично обратимый характер показывает, что деформация ползучести состоит из частично обратимых вязко-упругих перемещений (состоящих из чисто вязких и чисто упругих фаз) и возможно также необратимых пластических деформаций.

Упругая деформация полностью обратима при снятии нагрузки. Пластическая деформация полностью необратима, она может зависеть от времени и характерна отсутствием пропорциональности между пластической деформацией и приложенным напряжением или напряжением и скоростью деформации. Вязкая деформация необратима при снятии нагрузки, всегда зависит от времени и характеризуется наличием пропорциональности между скоростью вязкой деформации и приложенным напряжением и, следовательно, между напряжением и деформацией в заданное время. Рассмотренные типы деформаций могут быть систематизированы следующим образом.

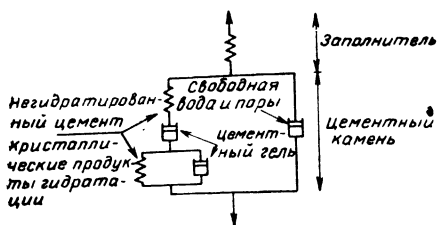


Рис. 6.44. Реологическая модель ползучести бетона

Упругая деформация полностью обратима при снятии нагрузки. Пластическая деформация полностью необратима, она может зависеть от времени и характерна отсутствием пропорциональности между пластической деформацией и приложенным напряжением или напряжением и скоростью деформации. Вязкая деформация необратима при снятии нагрузки, всегда зависит от времени и характеризуется наличием пропорциональности между скоростью вязкой деформации и приложенным напряжением и, следовательно, между напряжением и деформацией в заданное время. Рассмотренные типы деформаций могут быть систематизированы следующим образом.

Тип деформации	Мгновенная	Зависящая от времени
Обратимая	Упругая	Задержанная упругая
Необратимая	Пластическая	Вязкая

Анализ рассмотренных типов деформаций приводит к концепции реологических моделей, в которых различные деформации моделируются с помощью идеальных пружин и амортизаторов, а иногда с помощью тормоза и клапана. Для пружины деформация  $\epsilon$  пропорциональна приложенному напряжению  $\sigma$ , а для амортизатора скорость деформации  $\dot{\epsilon}_n$  за время  $t$  описывается выражением:

$$\frac{d\epsilon_n}{dt} = \sigma x \text{ (константа).}$$

На рис. 6.44 представлена одна из реологических моделей бетона, предложенная Хансенем.

Реологическая модель дает феноменологическое описание рассматриваемого явления, но ничего не говорит о действительном механизме ползучести бетона.

### ДЕЙСТВИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ

Ползучесть влияет на величины деформаций и прогибов, а часто также на распределение напряжений, однако ее действие зависит в значительной степени от типа конструкции.

Ползучесть неармированного бетона не влияет на его прочность, хотя при очень высоких уровнях нагрузки ползучесть ускоряет достижение предельной деформации, при которой наблюдается разрушение; это происходит только в тех случаях, когда постоянная нагрузка составляет более 85—90% кратковременной прочности бетона.

При низких уровнях напряжений объем бетона уменьшается (в свя-

зи с уменьшением за счет ползучести коэффициента Пуассона менее 0,5), и следует ожидать увеличения прочности бетона. Однако имеющиеся экспериментальные данные недостаточны.

Влияние ползучести на несущую способность свободно опертых железобетонных балок под действием постоянной нагрузки мало, прогиб за счет ползучести значительно увеличивается и может во многих случаях расчета и проектирования считаться предельным состоянием.

В железобетонных колоннах ползучесть приводит к постепенному перераспределению нагрузки с бетона на арматуру.

В статически неопределимых системах ползучесть способствует уменьшению напряжений, вызванных усадкой, действием температуры и перемещением опор. Во всех бетонных конструкциях ползучесть уменьшает внутренние напряжения, обусловленные неоднородностью усадки, что приводит к повышению трещиностойкости конструкции.

С другой стороны, в массивных бетонных элементах сама ползучесть может способствовать образованию трещин, когда бетонная масса, не имеющая возможности свободно деформироваться, подвергается действию температурных перепадов, вызванных тепловыделением при гидратации бетона и последующим охлаждением. Ползучесть уменьшает сжимающие напряжения, вызванные быстрым подъемом температуры, так что остаточное сжатие исчезает, как только начинается охлаждение бетона. При дальнейшем охлаждении в бетоне развиваются растягивающие усилия, и, поскольку величина ползучести уменьшается с возрастом, в нем могут образовываться трещины даже до того, как температура достигает начального уровня (рис. 6.45). По этой причине температуру внутри больших бетонных массивов следует контролировать путем использования цемента с умеренной экзотермией, снижением содержания цемента в бетоне, предварительным охлаждением составляющих бетонной смеси, сокращением высоты бетонных слоев и охлаждением бетона с помощью воды, циркулирующей по трубам, уложенным в бетоне. Потеря натяжения арматуры в предварительно напряженных бетонных элементах в результате ползучести бетона часто приводила к разрушению конструкции. Только при использовании высокопрочных арматурных сталей, удлинение которых в несколько раз превосходит деформации сжатия бетона за счет ползучести и усадки, можно применять предварительно напряженные конструкции.

Таким образом, действие ползучести может привести к нежелательным последствиям, однако в целом ползучесть в отличие от усадки способствует уменьшению концентрации напряжений в бетоне и успешному применению бетона как конструктивного материала.

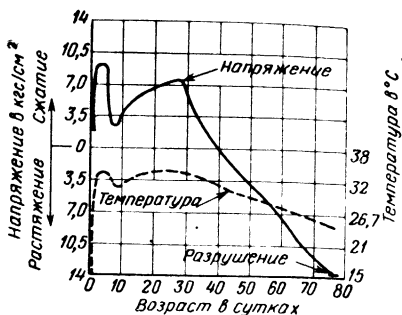


Рис. 6.45. Напряжения в бетоне под действием циклических температурных перепадов равной продолжительности

Долговечным называют бетон, выдерживающий без разрушения в течение многих лет условия эксплуатации, для которых он был предназначен.

Отсутствие долговечности может быть вызвано внешними воздействиями на бетон или внутренними процессами, происходящими в самом бетоне. Внешние воздействия — физические, химические или механические — могут быть следствием атмосферных воздействий, перепада температур, испарения, действия электролитов, природных и технологических растворов и газов. Степень повреждения, вызываемая этими воздействиями, в значительной степени определяется качеством бетона, хотя в некоторых случаях любой незащищенный бетон разрушается.

Внутренними причинами разрушения являются взаимодействие щелочей цемента с кремнеземом заполнителя, изменение объема из-за различия температурного расширения цементного камня и заполнителя и прежде всего проницаемость бетона. Проницаемость в значительной степени определяет стойкость бетона к внешним воздействиям, поэтому, как правило, долговечный бетон должен быть относительно непроницаемым. Разрушение бетона редко вызывается действием только одного фактора: часто бетон удовлетворительно выдерживает внешние воздействия, но при добавлении какого-то вредного воздействия происходит его разрушение. Поэтому бывает трудно объяснить причину разрушения одним определенным фактором, как правило, существенное влияние оказывает качество бетона.

### **ПРОНИЦАЕМОСТЬ БЕТОНА**

---

Проникание в бетон жидких агрессивных веществ существенно влияет на его долговечность, например при вымывании  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  или при действии агрессивных растворов. Интенсивность проникания их определяется проницаемостью бетона, которая является важной характеристикой стойкости бетона, в том числе ее морозостойкости. В армированном бетоне проникание влаги и воздуха вызывает коррозию арматуры, что ведет к увеличению ее объема, растрескиванию и отслаиванию защитного слоя бетона.

Проницаемость бетона представляет интерес для оценки водонепроницаемости емкостей для жидкостей и других конструкций, а также в связи с проблемой гидростатического давления в плотинах.



Таблица 7.1. Величины водопоглощения бетона, определенные различными способами

Условия высушивания	Условия насыщения	Водопоглощение в % для бетона составов					
		А	В	С	Д	Е	Ф
100° С	30 мин в воде	4,7	3,2	8,9	12,3	—	—
100° С	24 ч в воде	7,4	6,9	9,1	12,9	—	—
100° С	48 ч в воде	7,5	7	9,2	13,1	—	—
100° С	48 ч в воде + 5 ч кипячения	8,1	7,3	14,1	18,2	—	—
81° С	5 ч кипячения	6,4	6,4	13,2	17,2	—	—
До постоянного веса при 121° С	1 ч	—	—	—	—	3	7,4
	24 ч	—	—	—	—	3,4	7,7
	7 суток	—	—	—	—	3,5	7,8
В вакууме над известью в течение 30 суток при 20° С	1 ч	—	—	—	—	1,9	5,9
	24 ч	—	—	—	—	2,2	6,3
	7 суток	—	—	—	—	2,3	6,4

Следует отметить, что движение сквозь толщу бетона может обуславливаться не только давлением воды, но и градиентом влажности на противоположных поверхностях бетона или осмотическим эффектом.

Цементный камень и заполнитель имеют поры. Кроме того, в бетоне имеются пустоты в результате недостаточного уплотнения или водоотделения, которые могут составлять от 1 до 10% объема бетона. В последнем случае мы имеем раковистый бетон с очень низкой прочностью. Так как зерна заполнителя связаны в плотном бетоне цементным камнем, основную роль в проницаемости бетона играет проницаемость цементного камня.

Поры в цементном камне были рассмотрены ранее, но следует напомнить о различии между порами в геле и капиллярными порами. Первые составляют около 28% объема цементного камня, а вторые — от 0 до 40% в зависимости от водоцементного отношения и степени гидратации.

Объем пор в бетоне, как характеристика его проницаемости, измеряется водопоглощением, которое обычно определяется высушиванием образца до постоянного веса, насыщением водой и измерением увеличения веса в процентах к весу сухого образца. В табл. 7.1 приведены результаты определения водопоглощения бетонных образцов, полученные при различных режимах насыщения и высушивания. Из этой таблицы можно установить следующее: высушивание при нормальной температуре неэффективно для удаления всей влаги, а высушиванием при высокой температуре можно удалить и часть связанной воды. Таким образом, водопоглощение не может служить методом определения качества бетона, но большинство доброкачественных бетонов имеет величину водопоглощения менее 10%\*.

\* С этим утверждением нельзя согласиться. Для бетонов, характеризующихся различной структурой, водопоглощение существенно различается, что и видно из данных табл. 7.1. (Прим. ред.)

Фильтрация воды через бетон подчиняется общим законам фильтрации через пористые тела. Цементный камень состоит из частиц, соединенных друг с другом только на небольшой части их общей поверхности, часть воды находится в пределах поля сил твердой фазы, т. е. адсорбируется. Эта вода имеет большую вязкость, но достаточно подвижна и участвует в фильтрации.

Проницаемость бетона не является простой функцией его пористости, но зависит также от размера, длины и распределения пор. Так, хотя

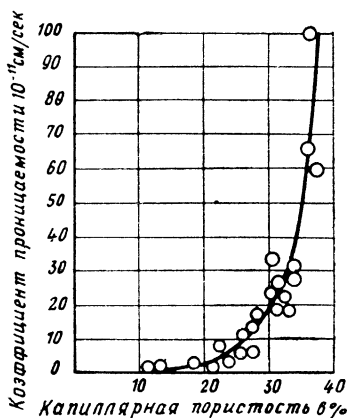


Рис. 7.1. Зависимость между проницаемостью и капиллярной пористостью цементного камня

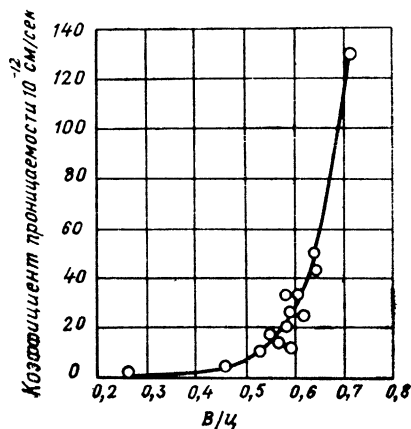


Рис. 7.2. Соотношение между проницаемостью и водоцементным отношением затвердевшего цементного камня (93% цемента прогидратировано)

пористость цементного геля 28%, его проницаемость составляет всего  $7 \cdot 10^{-14}$  см/сек [7.3]. Это объясняется очень тонкой структурой твердеющего цементного теста: поры и твердые частицы очень малы и многочисленны, в то время как в заполнителе большие по размеру поры, хотя и в меньшем количестве, приводят к более высокой проницаемости. По этой же причине вода проникает через капиллярные поры значительно легче, чем через малые поры геля: цементный камень в своей массе в 20—100 раз более проницаем, чем сам гель.

Таким образом, проницаемость цементного камня определяется его капиллярной пористостью. Связь между этими двумя характеристиками приведена на рис. 7.1.

Для сравнения в табл. 7.2 приведены водоцементные отношения цементного камня, имеющего ту же проницаемость, что и обычные горные породы. Интересно, что проницаемость гранита имеет тот же порядок, что и бетона с  $В/Ц = 0,7$ , т. е. не очень высокого качества.

Проницаемость цементного камня меняется в процессе его гидратации. В цементном тесте фильтрация воды определяется размером, формой и концентрацией цементных частиц. В процессе гидратации прони-

Таблица 7.2. Проницаемость горных пород и цементного камня

Горные породы	Коэффициент проницаемости в см/сек	$V/C$ затвердевшего цементного камня той же проницаемости
Плотный базальт . . . . .	$2,47 \cdot 10^{-12}$	0,38
Кварцевый диорит . . . . .	$8,24 \cdot 10^{-12}$	0,42
Мрамор . . . . .	$2,39 \cdot 10^{-11}$	0,48
» . . . . .	$5,77 \cdot 10^{-10}$	0,66
Гранит . . . . .	$5,35 \cdot 10^{-9}$	0,7
Песчаник . . . . .	$1,23 \cdot 10^{-8}$	0,71
Гранит . . . . .	$1,56 \cdot 10^{-8}$	0,71

цаемость резко уменьшается, так как объем геля (включая поры) примерно в 2,1 раза больше объема негидратированного цемента и гель заполняет часть пор, которые вначале были заполнены водой.

В затвердевшем цементном камне проницаемость зависит от размера, формы и концентрации частиц геля и замкнутости капилляров. В табл. 7.3 приведены значения коэффициента проницаемости цементного камня с  $V/C=0,7$  в разном возрасте. Для цементного камня с одинаковой степенью гидратации проницаемость тем ниже, чем выше содержание цемента, т. е. чем ниже водоцементное отношение. Рис. 7.2 показывает величины проницаемости цементного камня, в котором прогидратировало 93% цемента.

Таблица 7.3. Снижение проницаемости цементного камня ( $V/C=0,7$ ) в процессе его гидратации

Возраст	Коэффициент проницаемости $K$ , см/сек
Сразу после затворения	$2 \cdot 10^{-4}$
5 суток	$4 \cdot 10^{-8}$
6 »	$1 \cdot 10^{-8}$
8 »	$4 \cdot 10^{-9}$
13 »	$5 \cdot 10^{-10}$
24 »	$1 \cdot 10^{-10}$
Окончательно	$6 \cdot 10^{-11}$ (вычислен)

Наклон кривой значительно меньше для цементного камня с  $V/C$  менее 0,6, т. е. для цементного камня с прерывистыми капиллярами.

На рис. 7.2 видно, что уменьшение  $V/C$  от 0,7 до 0,3 снижает коэффициент проницаемости в тысячу раз. Такое же снижение имеет место в цементном камне с  $V/C=0,7$ , за период от 7 суток до 1 года.

Проницаемость бетона зависит от свойств цемента. При одинаковом водоцементном отношении цемент грубого помола образует более пористый цементный камень, чем цемент тонкого помола.

Состав цемента влияет на проницаемость лишь настолько, насколько изменяется степень гидратации. В целом, можно предположить, что

чем выше прочность цементного камня, тем ниже его проницаемость, а прочность — функция относительного объема геля в свободном пространстве.

Это положение имеет лишь одно исключение: высушивание цементного камня повышает его проницаемость, возможно, вследствие того, что усадка разрушает часть геля между капиллярами и таким образом открывает новые пути для воды.

Воздухововлечение повышает проницаемость бетона. Однако, так как воздухововлечение уменьшает расслаиваемость и водоотделение и повышает удобоукладываемость, позволяя применять более низкое  $V/C$ , в целом действие воздухововлечения не обязательно отрицательное.

Проницаемость бетона может быть измерена в лаборатории рядом простых методов, но в результате этих измерений могут быть получены лишь сравнительные данные. Боковые грани испытываемого образца уплотнены и вода под давлением подается только к верхней его грани.

Для создания давления часто используют сжатый воздух. При этом нужно следить, чтобы в воде не было воздуха, так как в противном случае при снижении давления воздух может проникнуть (выделиться) в образец и уменьшить величину фильтрации. Измеряется количество воды, прошедшее через бетонный образец данной толщины за определенное время и определяется коэффициент проницаемости  $K$  по формуле Дарси:

$$\frac{dq \cdot l}{dtA} = K \frac{\Delta h}{L},$$

где  $\frac{dq}{dt}$  — скорость фильтрации воды в  $см^3/сек$ ;  $A$  — площадь поперечного сечения в  $см^2$ ;  $\Delta h$  — снижение гидравлического давления в образце в  $см$ ;  $L$  — толщина образца в  $см$ ; размерность  $K$  —  $см/сек$ .

Измерения проницаемости могут быть проведены на образцах с целью изучения влияния изменений состава бетона, способов перемешивания, укладки и ухода за бетоном. Эти испытания позволяют также судить о долговечности бетона, подвергающегося коррозионному действию фильтрующей воды.

### ХИМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БЕТОН

Только небольшая часть от общего объема применяемого в строительстве бетона подвергается сильным химическим воздействиям. И это хорошо, так как стойкость бетона к действию химических агентов ниже, чем к другим воздействиям.

Наиболее часто встречающимися формами химической агрессии являются выщелачивание цемента, действие сульфатов, морской воды и природных слабокислых вод<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Наиболее четкая классификация процессов коррозии бетона была предложена В. М. Москвиным [49]. В зависимости от природы коррозионных процессов они подразделяются на: процессы коррозии I вида, характеризуемой растворением компо-

Стойкость бетона зависит от вида применяемого цемента. Установлено, что стойкость его повышается в такой последовательности:

- 1) обычный и быстротвердеющий портландцемент;
- 2) шлакопортландцемент или низкотермичный портландцемент;
- 3) сульфатостойкий портландцемент или пуццолановый портландцемент;
- 4) сульфатношлаковый (гипсошлаковый) цемент;
- 5) глиноземистый цемент.

Следует отметить, что в ряде случаев плотность и проницаемость бетона влияют на его долговечность значительно больше, чем вид применяемого цемента.

### ДЕЙСТВИЕ СУЛЬФАТОВ

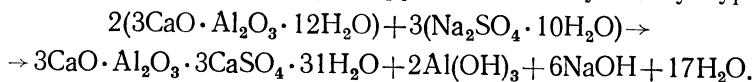
Твердые соли не действуют на бетон, но, находясь в растворе, они вступают в реакцию с цементным камнем. Некоторые глины содержат щелочи, сульфаты магния и кальция, а грунтовые воды в таких глинах являются растворами сульфатов. Сульфаты вступают в реакцию с гидратом окиси кальция и гидроалюминатом кальция цементного камня.

Продукты реакции — гипс и сульфоалюминат кальция — имеют значительно больший объем, чем исходные компоненты, поэтому взаимодействие с сульфатами вызывает расширение и разрушение бетона. Реакцию сульфата натрия и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  можно записать следующим образом:



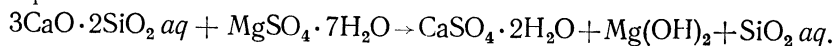
$\text{Ca}(\text{OH})_2$  может полностью выщелачиваться фильтрующей водой, но если происходит накопление  $\text{NaOH}$ , устанавливается равновесие и только через  $\text{SO}_3$  осаждается в виде гипса.

Гидроалюминат кальция реагирует по следующему уравнению



Сульфат кальция действует только на гидроалюминат кальция, образуя гидросульфоалюминат кальция ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ).

Сульфат магния вступает в реакцию с гидросиликатом кальция, так же, как с гидратом окиси кальция и гидроалюминатом кальция, например:



Вследствие очень малой растворимости  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  эта реакция идет до конца, поэтому в ряде случаев воздействие сульфата магния опаснее, чем других сульфатов.

нентов цементного камня при действии мягкой воды; процессы коррозии II вида, в которых определяющим является химическое взаимодействие агрессивного компонента внешней среды с цементным камнем и ослабление, таким образом, его структуры, и процессы коррозии III вида, при которой разрушение бетона обусловлено возникновением внутренних напряжений в результате образования продуктов коррозии в структуре цементного камня. (Прим. ред.)

Агрессивное действие сульфатов повышается с увеличением их концентрации, но при содержании более 0,5%  $MgSO_4$  и 1%  $Na_2SO_4$  степень агрессивного воздействия возрастает медленнее. Концентрация сульфатов выражается обычно количеством весовых частей  $SO_3$  на миллион и принимается: при 1000 как средне-агрессивное воздействие, а при 2000 — как сильно агрессивное, особенно если это относится к  $MgSO_4$ .

Интенсивность воздействия на бетон зависит кроме концентрации сульфатов также от возможности замещения сульфатов, удаляемых из

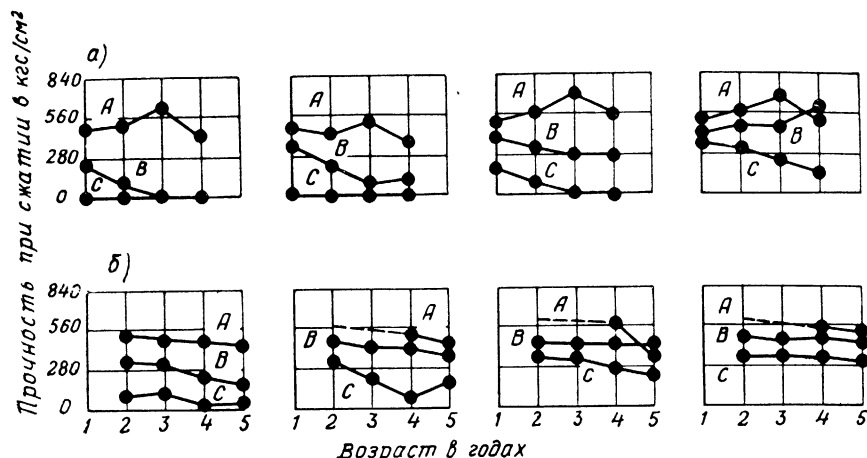


Рис. 7.3. Влияние условий испытаний на прочность бетонов, изготовленных на различных цементах. Составы и условия хранения описаны в тексте

а — хранение в сульфате натрия; б — в сульфатах магния и натрия

раствора вследствие реакции с цементом. При оценке опасности воздействия сульфатов следует учитывать также движение грунтовых вод.

При действии на бетон одностороннего давления воды, насыщенной сульфатами, степень агрессивности наибольшая. Попеременное насыщение и высушивание также ведет к быстрому разрушению. С другой стороны, условия, когда бетон полностью насыщен и грунтовые воды не могут в него проникнуть, значительно менее опасны. О действии сульфатов можно судить по внешнему виду бетона. Разрушение обычно начинается на углах и гранях, затем наблюдается растрескивание и шелушение с последующим переходом бетона в рыхлое состояние.

Стойкость бетона при действии сульфатов может быть повышена применением цементов с низким содержанием  $C_3A$ . Из практики известно, что содержание  $C_3A$ , равное 7%, разделяет цементы на стойкие и нестойкие в растворах сульфатов. Имеются, очевидно, и другие, не изучен-

\* В СССР действуют детально разработанные дифференцированные нормы агрессивности воды среды для бетона, учитывающие условия взаимодействия внешней среды и бетона, и плотность бетона [50]. (Прим. ред.)

ные до настоящего времени, факторы, влияющие на сульфатостойкость цемента.

Сульфатостойкость увеличивается при добавлении в цемент пуццоланы или при замене ею части цемента. При этом связывается свободный  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , но такой бетон нужно выдержать определенное время, прежде чем помещать его в среду, содержащую сульфаты.

Сульфатостойкость бетона зависит также от его непроницаемости. Это отмечалось уже ранее, но не будет лишним вернуться к вопросу снова. Например, применение тощего бетона в фундаментах приводит к повреждению конструкций, в других условиях достаточно долговечных. Плотный бетон должен иметь низкое водоцементное отношение, т. е. содержать достаточное количество цемента. Даже бетон на глиноземистом цементе не должен иметь состав более тощий, чем 1:9, иначе бетон будет пористым, а следовательно, нестойким. На рис. 7.3 показано влияние пятилетних натуральных испытаний на прочность при сжатии следующих составов.

Состав	Расход цемента в $\text{кг}/\text{м}^3$	В/Ц
А	390	0,4
В	307	0,5
С	223	0,75

Условия испытания: № 1 — в сульфате натрия, № 2 — в сульфатах натрия и магния в разных состояниях.

Можно заметить, что бетоны с расходом цемента  $385 \text{ кг}/\text{м}^3$  разрушаются медленно, даже если они приготовлены на обычном порландцементе. При низком содержании цемента действие сульфатов происходит быстрее и состав цемента оказывает большее влияние на долговечность бетона. Автоклавная обработка повышает сульфатостойкость бетона. Это относится к бетонам на сульфатостойком и обычном цементе и объясняется переходом  $\text{C}_3\text{АН}_6$  в менее реакционноспособную (более стабильную) форму и удалением  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  вследствие реакции с кремнеземом.

Введение в бетонную смесь добавки хлористого кальция снижает сульфатостойкость независимо от вида применяемого цемента.

### ИСПЫТАНИЕ НА СУЛЬФАТОСТОЙКОСТЬ

Стойкость бетона к воздействию сульфатов может быть определена в лабораторных условиях хранением образцов в растворах сульфата натрия, сульфата магния или смеси. Попеременное увлажнение и высушивание ускоряет разрушение, вызываемое кристаллизацией солей в порах бетона. О результатах можно судить по потере прочности образцов, изменению динамического модуля упругости, расширению и изменению внешнего вида образцов.

На рис. 7.4 показано изменение динамического модуля упругости образцов из цементного раствора 1:3 (после 78 суток влажного хранения) в 5%-ном растворе сульфатов.

Результаты прочностных испытаний образцов-балочек из цементного раствора состава 1:3 в 0,15 молярного раствора  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  приведены на рис. 7.5.

Испытания образцов состава 1:6 (цемент:песок) в аналогичных растворах сульфатов показали, что расширение 0,1% после четырех недель является граничной величиной для определения удовлетворительных или неудовлетворительных результатов. Общим не-

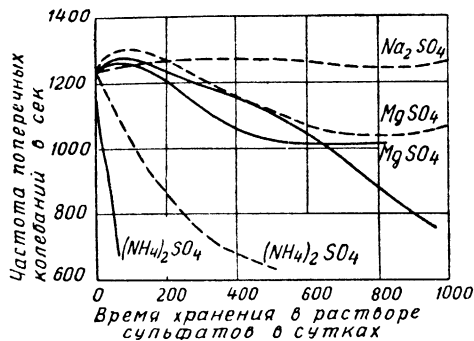


Рис. 7.4. Изменение динамического модуля упругости образцов из цементного раствора 1:3 при хранении в 5%-ных растворах сульфатов

— обычный портландцемент; - - - сульфатостойкий цемент

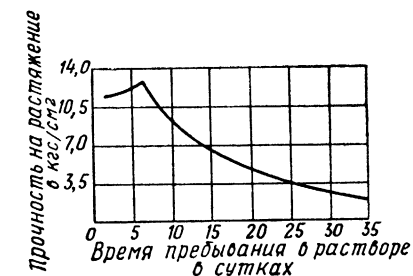


Рис. 7.5. Прочность образцов-кубиков из цементного раствора состава 1:3 после хранения в 0,15 м. растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

достатком лабораторных испытаний растворных образцов является то, что они более чувствительны к химической стойкости цемента, чем к физической структуре цементного камня, в итоге качество бетона не отражается непосредственно при определении стойкости малых растворных образцов.

### ДЕЙСТВИЕ МОРСКОЙ ВОДЫ

Морская вода содержит сульфаты и механизм действия на бетон аналогичен рассмотренному выше. Кроме химического воздействия, кристаллизация солей в порах бетона может приводить к его разрушению вследствие давления кристаллов соли. Так как кристаллизация происходит там, где вода испаряется, этот вид воздействия наблюдается в надводной части бетона.

Хотя раствор соли перемещается в бетоне в результате капиллярного подсоса, он действует на бетон только, если вода может проникнуть в глубь бетона, следовательно, и в этом случае непроницаемость бетона — наиболее надежное средство его защиты.

Бетон в зоне переменного уровня воды, подвергающийся попеременному увлажнению и высушиванию, разрушается быстрее, чем постоянно



увлажняемый бетон. Фактическое действие морской воды изменяется и замедляется вследствие осаждения в порах бетона гидрата окиси магния. В тропическом климате воздействие морской воды более интенсивно.

В ряде случаев воздействие морской воды на бетон сопровождается разрушающим действием мороза, ударов волн, истирания; все это усиливает разрушение бетона.

Хотя действие сульфатов в морской воде аналогично действию насыщенных сульфатами грунтовых вод, оно не сопровождается расширением бетона, определяемым лабораторными испытаниями, как в предыдущем случае. Отсутствие расширения объясняется присутствием в морской воде большого количества хлоридов, замедляющих расширение: гипс и сульфоалюминат кальция обладают большей растворимостью в растворах хлоридов, чем в воде, и поэтому вымываются морской водой, а в лабораторных испытаниях они остаются на месте и вызывают расширение. Это лишнее доказательство трудности распространения результатов лабораторных исследований на реальные условия эксплуатации.

В армированном бетоне вследствие поглощения солей возникают анодная и катодная зоны, в результате электролитических процессов происходит осаждение на арматуре продуктов коррозии, которое вызывает разрушение окружающего бетона. Таким образом, действие морской воды более опасно для армированного бетона, чем для неармированного. Поэтому необходимо обеспечивать достаточную толщину защитного слоя бетона у арматуры (5,1 или лучше 7,6 см) и применять плотный непроницаемый бетон. Для бетона, расположенного ниже горизонта низких вод, рекомендуется расход цемента  $297 \text{ кг/м}^3$ , а выше этого уровня —  $356 \text{ кг/м}^3$  или  $V/C$  не более 0,4—0,45.

Водоцементное отношение и расход цемента являются важными факторами; повышенный расход цемента позволяет получить плотную смесь при низком водоцементном отношении. Хорошее уплотнение бетона и высокое качество работ, особенно в конструкциях стыков, имеют большое значение. Вид применяемого цемента имеет меньшее значение; хорошие результаты дают глиноземистый, сульфатостойкий, шлакопортландцемент и пуццолановый портландцемент.

### ДЕЙСТВИЕ КИСЛОТ

Во влажной атмосфере  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и другие кислые газы действуют на бетон: растворяют и удаляют частицы затвердевшего цемента и превращают бетон в рыхлую пористую массу. Этот вид воздействия встречается в дымовых трубах и железнодорожных тоннелях, при паровой тяге, а также в промышленных производствах. Действие различных кислот подробно исследовалось Ли. Следует лишь напомнить, что все виды портландцемента неацетостойки.

Бетоны разрушаются также при действии воды, содержащей свободную  $\text{CO}_2$ ; например, болотной воды. Вода, образующаяся при таянии

льда или конденсации и содержащая небольшое количество  $\text{CO}_2$ , растворяет  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , вызывая разрушение поверхности бетона.

На этот вид воздействия следует обращать особое внимание при строительстве труб и лотков в горных районах не только с точки зрения долговечности, но и потому, что выщелачивание цемента обнажает заполнитель и повышает шероховатость труб. Поэтому предпочтительнее

применение заполнителей из карбонатных пород. Хотя бытовые сточные воды имеют щелочную реакцию и не действуют на бетон, разрушения канализации наблюдались во многих случаях, особенно при высоких температурах, когда сернистые соединения превращаются с помощью анаэробных бактерий в  $\text{H}_2\text{S}$ . Это соединение само по себе не является разрушающим агентом, но, растворяясь в пленках влаги на поверхности бетона и окисляясь аэробными бактериями, оно переходит в серную кислоту. Разрушение происходит выше уровня сточных вод вследствие растворения цемента.

Проводятся различные физические и химические испытания кислотостойкости бетона, но стандартных методов испытаний до сих пор не существует. Предпочтительнее реальные условия испытаний,

так как при испытаниях в концентрированной кислоте все цементы растворяются и нельзя установить относительного преимущества одного из них. Поэтому следует относиться с осторожностью к интерпретации результатов ускоренных испытаний.

Сопrotивление бетона химическому воздействию повышается при его предварительном высушивании. Пленка карбоната кальция, образующаяся при взаимодействии гидрата окиси кальция с  $\text{CO}_2$ , колыматирует поры и уменьшает проницаемость поверхностного слоя бетона. Поэтому бетон заводского изготовления обычно более стоек, чем монолитный<sup>1</sup>. Влияние условий твердения показано на рис. 7.6.

<sup>1</sup> Стойкость бетона к химическим воздействиям зависит в значительной степени от его плотности — проницаемости. При заводском изготовлении обычно применяют тепловлажностную обработку, которая может повысить проницаемость бетона и тем самым существенно снизить его стойкость. (Прим. ред.)

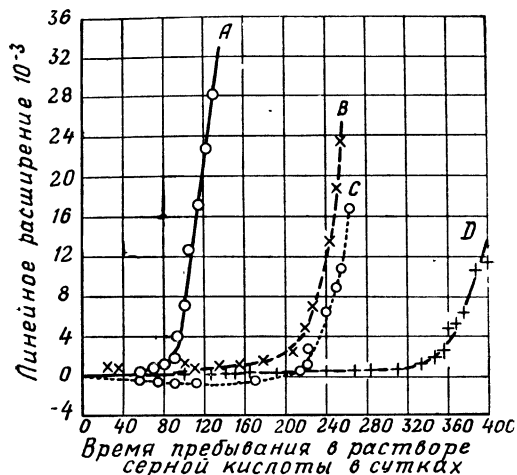
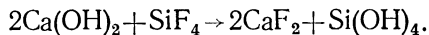


Рис. 7.6. Влияние условий твердения на расширение образцов цементного раствора, погруженных в 1%-ный раствор серной кислоты

A — в воде при 24° С в течение 78 сут.; B — пропаривание 95° С в течение 4 ч, а затем твердение на воздухе в помещении в течение 78 сут.; C — воздушное твердение при 21° С и относительной влажности воздуха 80% в течение 78 сут.; D — автоклавная обработка под давлением 10,5 кгс/см<sup>2</sup> в течение 4 ч и твердение на воздухе в помещении в течение 78 сут.

Ca(OH)<sub>2</sub> может быть сохранен также при обработке жидким стеклом (силикат натрия). Образующиеся силикаты кальция заполняют поры и кислотостойкость бетона возрастает, возможно вследствие образования коллоидного кремнегеля. С успехом применяется также обработка поверхности каменноугольным дегтем, резиновыми или битумными мастиками, кремнефтористым магнием и др. Защитные свойства этих покрытий различны, но любое из них не должно иметь механических повреждений, поэтому необходим их осмотр и периодическое возобновление. Надежной защиты бетона от действия кислот можно добиться обработкой его в вакууме SiF<sub>4</sub>— газ реагирует с гидратом окиси кальция:



Эту обработку применяют для бетона заводского изготовления. Такой бетон называют ократированным.

### **ВЫСОЛЫ**

Выщелачивание, о котором говорилось ранее, может в определенных условиях привести к отложению солей на поверхности бетона, называемому высолами. Это наблюдается, например, при фильтрации воды через плохо уложенный бетон, сквозь трещины или плохо сделанные стыки, а также, когда происходит испарение с поверхности бетона. Карбонат кальция, образованный реакцией Ca(OH)<sub>2</sub> с CO<sub>2</sub>, создает на поверхности белый налет. Отлагается также сульфат кальция.

Высолы могут образовываться и при применении непромытых заполнителей, взятых с морского берега. Слой соли на поверхности зерен заполнителя приводит к образованию белого налета на поверхности бетона. Аналогичный эффект вызывает присутствие в заполнителе щелочей и гипса. Высолы ухудшают внешний вид бетона.

### **ДЕЙСТВИЕ МОРОЗА НА СВЕЖЕУЛОЖЕННЫЙ БЕТОН**

Прежде чем перейти к действию замораживания и оттаивания на затвердевший бетон, т. е. касаться одной из основных проблем долговечности, остановимся на действии мороза на свежеуложенный бетон и связанном с этим вопросе зимнего бетонирования.

При замораживании еще не схватившегося бетона действие мороза на него будет похоже на вспучивание водонасыщенного грунта: вода затворения при замораживании вызывает увеличение объема бетона, и, так как на химические реакции воды не остается, схватывание и твердение бетона замедляется.

Наблюдения показали, что если бетон заморозить сразу после укладки, схватывания не происходит и цементного камня, который мог бы разрушиться от льдообразования, не образуется. Бетон, оставленный при низкой температуре, не схватывается. Если произойдет оттаивание и бетон будет подвергнут повторному вибрированию, он будет схватыв-

ваться и твердеть без потери прочности. Но, вследствие расширения воды затворения при замерзании, в бетоне при повторном вибрировании образуется значительный объем пор и соответственно прочность будет очень низкой.

Замораживание бетона после схватывания, но до приобретения им необходимой прочности, вызывает расширение вследствие льдообразования,

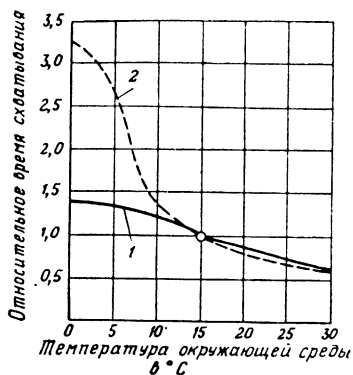


Рис. 7.7. Отношение сроков схватывания обычного портландцемента при различной температуре к срокам схватывания при 15°С

1 — начало схватывания; 2 — конец схватывания

что приводит к разрушению и невосполнимой потере прочности. Если бетон имеет достаточную начальную прочность, он может подвергаться замораживанию без разрушения не только вследствие более высокого сопротивления давлению льда, но и потому, что большая часть воды затворения связывается цементом или располагается в порах геля и замерзнуть не может. Однако трудно установить, когда достигаются эти условия, так как схватывание (рис. 7.7) и твердение цемента зависят от температуры в период, предшествующий замораживанию. В целом, чем интенсивнее идет процесс гидратации и выше прочность бетона, тем меньше он подвержен действию замораживания. Достаточной прочностью является прочность от 50 до 140 кгс/см<sup>2</sup>. Но данные о прочно-

сти, при которой бетон выдерживает температуру ниже точки замерзания, отсутствуют. На рис. 7.8 показано влияние возраста бетона в начале замораживания на расширение бетона; заметное снижение величины расширения бетона происходит после твердения в течение 24 ч, в течение этого периода рекомендуется защищать бетон от мороза.

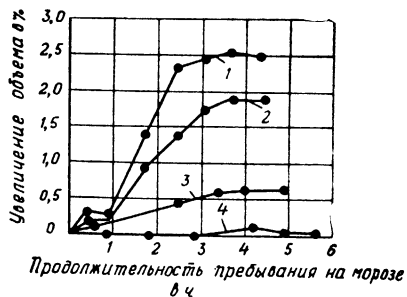


Рис. 7.8. Влияние возраста бетона при замораживании на увеличение его объема

возраст при замораживании: 1 — 4 ч; 2 — 8 ч; 3 — 16 ч; 4 — 36 ч

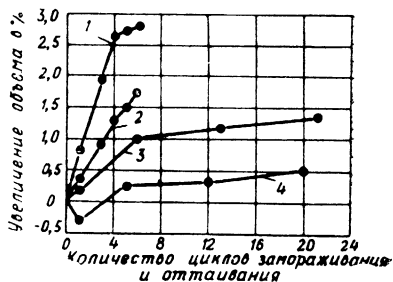


Рис. 7.9. Влияние возраста бетона к началу замораживания на увеличение объема бетона при попеременном замораживании и оттаивании (обозначения те же, что и на рис. 7.8)

Сопrotивление бетона попеременному замораживанию и оттаиванию также зависит от возраста бетона, при котором начинается первый цикл (рис. 7.9), но этот вид воздействия более опасен, чем продолжительное замораживание без оттаивания, и несколько циклов могут вызвать разрушение бетона, предварительно выдержанного в течение 24 ч при 20°С. Следует заметить, что нет прямой зависимости между стойкостью к замораживанию свежешуложенного бетона и долговечностью зрелого бетона, подвергаемого многократному попеременному замораживанию и оттаиванию.

### **ЗИМНЕЕ БЕТОНИРОВАНИЕ**

Чтобы избежать действия мороза на свежий бетон, следует принимать различные предохранительные меры. Температура во время укладки может быть повышена подогревом компонентов бетонной смеси. Воду подогревать легко, но ее температура не должна превышать 60—80°С, так как иначе может произойти мгновенное схватывание цемента, при этом следует учитывать разность температур воды и цемента. Важно также предохранить цемент от контакта с горячей водой, поэтому должен соблюдаться порядок загрузки компонентов в бетономешалку. Если подогрев воды недостаточно повышает температуру бетона, можно подогреть заполнители. Подогрев заполнителей предпочтительнее осуществлять пропуском пара через змеевик, чем использовать острый пар, так как последний меняет влажность заполнителя. Подогрев заполнителей выше 50°С не рекомендуется. Температура компонентов бетонной смеси должна контролироваться. Температура бетона рассчитывается заранее, чтобы избежать схватывания при слишком высокой температуре, так как оно существенно влияет на рост прочности бетона. Кроме того, высокая температура бетонной смеси уменьшает ее удобоукладываемость и может вызвать значительную температурную усадку<sup>1</sup>.

Поэтому предпочтительнее, когда схватывание проходит при температуре —21°С, но нужно, чтобы температура была не ниже 10°С в течение следующих трех дней. Лучшие результаты получаются при температуре 21°С и большем периоде контролируемой температуры.

Необходимое время выдерживания бетона перед замораживанием определяется процессом твердения и может быть определено расчетами. Поэтому следует помнить, что если схватывание произошло до замораживания и бетон обладает начальной прочностью, гидратация будет продолжаться (с низким тепловыделением) во всех незамерзших порах, возможно до температуры —4°С или даже ниже. Когда период замораживания прекращается, продолжается нормальный набор прочности в соответствии с законами твердения (с правилом «зрелость»).

Температура бетона в ранние сроки укладки может быть обеспечена применением жирных смесей с низким  $V/C$ , а также использованием

<sup>1</sup> В последние годы на заводах сборного железобетона в СССР все более широкое применение находит специальный подогрев бетонных смесей. (Прим. ред.)

высокотермичного цемента с высоким содержанием  $C_3S$  и  $C_3A$ . Ускорители, как, например, хлористый кальций, ускоряют гидратацию цемента. Хлористый кальций снижает также температуру замерзания воды затвердения на  $1,1—1,7^\circ$ . В действительности вода в бетонной смеси — это раствор соли, и ее точка замерзания на  $2,8^\circ$  ниже точки замерзания чистой воды.

Существует ряд предупредительных мероприятий, применяемых на практике. Например, бетон не следует охлаждать при транспортировании от смесителя к месту укладки и нельзя укладывать на замерзшую поверхность.

Температура после укладки обеспечивается изоляцией бетона от атмосферных воздействий, созданием, в случае необходимости, укрытия вокруг бетона и подачей тепла под укрытие. Обогрев должен быть выбран так, чтобы не пересушить бетон, не перегреть отдельные его части и избежать высокой концентрации  $CO_2$  в атмосфере. Поэтому мятый пар, вероятно, лучший теплоноситель. Может применяться также электропрогрев бетона с установкой электродов внутрь бетона или с использованием в качестве электродов арматуры. Чем меньше конструкция, тем легче она промерзает и тем тщательнее должна быть защита ее от мороза.

Действие мороза зависит также от перепада температур; опасность возрастает при резком понижении температуры, сопровождаемом ветром. Снег в то же время может служить естественной защитой бетона<sup>1</sup>.

### **ДЕЙСТВИЕ МОРОЗА НА ЗАТВЕРДЕВШИЙ БЕТОН**

Рассмотрим теперь затвердевший бетон, подвергаемый попеременному замораживанию и оттаиванию в интервале температур, наиболее часто встречающемся в природе.

С понижением температуры насыщенного водой затвердевшего бетона вода, проникая в поры цементного камня, замерзает аналогично замерзанию в капиллярах горных пород и вызывает расширение бетона.

При повторном замораживании происходит дальнейшее расширение, так что повторные циклы замораживания и оттаивания имеют кумулятивный эффект. Большие поры в бетоне, образуемые при недостаточном уплотнении, обычно заполнены воздухом и поэтому не оказывают существенного влияния на действие мороза.

Замораживание — процесс постепенный вследствие небольшой скорости теплопереноса через бетон, увеличения концентрации щелочей в еще не замерзшей воде, а также вследствие изменения температуры замерзания в зависимости от размера пор.

Хотя поверхностное натяжение кристаллов льда в капиллярах соз-

---

<sup>1</sup> Способы зимнего бетонирования детально разработаны в СССР и находят здесь широкое применение [51]. (Прим. ред.)

дает в них давление, тем большее, чем меньше кристалл, заморажива-ние начинается в больших порах и постепенно распространяется на меньшие.

Поры геля слишком малы для образования кристалликов льда при температуре выше  $-78^{\circ}\text{C}$ , поэтому обычно лед в них не образуется. С понижением температуры вследствие разной энтропии воды геля и льда вода геля приобретает потенциальную энергию, позволяющую ей двигаться по капиллярам, содержащим лед. Диффузия воды геля приводит к росту кристаллов льда и к расширению цементного камня.

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

Вторая расширяющая сила в бетоне возникает вследствие диффузии воды, приводящей к росту относительно небольшого количества кристаллов льда. Рядом исследований установлено, что последний механизм играет важную роль в разрушении бетона под действием мороза. Эта диффузия вызывается осмотическим давлением из-за местного увеличения концентрации раствора вследствие отделения замерзающей (чистой) воды от раствора.

Например, плита, замораживаемая сверху, разрушается, если вода подходит к ее основанию и может проникать сквозь толщу плиты вследствие осмотического давления. Влажность бетона становится выше, чем до замораживания, и в ряде случаев наблюдаются разрушения вследствие расслоения бетона кристаллами льда.

Об осмотическом давлении следует напомнить и в другой связи. Соли, применяемые для борьбы с обледенением дорог, поглощаются поверхностным слоем бетона. Это создает высокое осмотическое давление, сопровождающееся движением воды к наиболее холодной зоне, где происходит замораживание. Экспериментальные данные об этом процессе, однако, недостаточны.

Когда давление расширения в бетоне превышает предел его прочности при растяжении, происходит разрушение. Степень разрушения варьирует от шелушения поверхности до полного разрушения, так как линзы льда образуются, начиная с поверхности бетона и распространяясь в глубь его. В Англии бордюрные камни (которые остаются влажными в течение долгого времени) наиболее подвержены действию замораживания по сравнению с другими бетонными конструкциями. При применении солей для борьбы с обледенением дорожные плиты также находятся в тяжелых условиях эксплуатации. В странах с суровым климатом наблюдаются значительные разрушения бетона от действия мороза, если не принимаются специальных мер при его изготовлении.

Таблица 7.4. Влияние влажности образцов перед замораживанием на прочность бетона на сжатие

Количество циклов замораживания и оттаивания	Прочность при сжатии в % к прочности образцов в возрасте 7 суток		
	замороженных во влажном состоянии	замороженных в сухом состоянии	хранившихся при нормальной температуре
0	100	100	100
10	141	165	189
20	137	189	240
30	119	201	263
40	99	211	304
50	63	220	332
60	0	228	354

Морозостойкость бетона зависит от ряда его свойств: прочности цементного камня, растяжимости, ползучести, но главными среди них являются степень насыщения и структура порового пространства цементного камня.

Влияние насыщения бетона показано на рис. 7.10. Ниже критического уровня насыщения бетон обладает высокой морозостойкостью, а сухой бетон вообще не разрушается (табл. 7.4). Следует заметить, что даже в образцах водного твердения не все поры заполнены водой, вследствие чего эти образцы не разрушаются от первого же замораживания. Бетон при эксплуатации в естественных условиях теряет влагу. При повторном увлажнении он уже не может поглотить то же количество воды, какое было им потеряно. Поэтому перед эксплуатацией в условиях зимы бетон целесообразно высушивать, если этого не сделать — разрушения от действия мороза будут больше.

Какова критическая величина насыщения? Закрытый контейнер, в котором более 91,7% объема занято водой, будет при замораживании заполнен льдом и разорвется. Таким образом, 91,7% является критическим насыщением в замкнутом объеме. Это не относится к пористым телам, где критическое насыщение зависит от размера образца, его однородности и скорости замораживания. Пустоты, в которые может удаляться избыточная вода, должны быть расположены достаточно близко к порам, в которых образуется лед, на этом основано использование воздухововлечения: если цементный камень разделен на достаточно тонкие слои пузырьками воздуха, у него нет критического насыщения. Аналогично у зерна заполнителя нет критического размера, если оно имеет низкую пористость или если его капиллярная система нарушена достаточно большим количеством макропор. Зерно заполнителя в бетоне не может рассматриваться как закрытая емкость, если низкая проницаемость окружающего его цементного камня не позволяет воде проникать в воздушные поры с достаточной скоростью. Таким образом, зерно заполнителя, насыщенное водой выше 91,7%, вызовет при замораживании разрушение окружающего бетона.



Следует отметить, что, как правило, заполнители имеют пористость от 0 до 5%, заполнители с большей пористостью обычно не применяют. Но и использование последних не обязательно приводит к разрушению от действия мороза<sup>1</sup>. Крупные поры, имеющиеся в ячеистом бетоне и в беспесчаном бетоне, повышают, очевидно, морозостойкость этих материалов.

При применении обычных заполнителей также не удастся установить определенной зависимости между пористостью заполнителя и морозостойкостью бетона.

Влияние высушивания заполнителей перед приготовлением смеси на долговечность бетона показано на рис. 7.11. Можно отметить, что

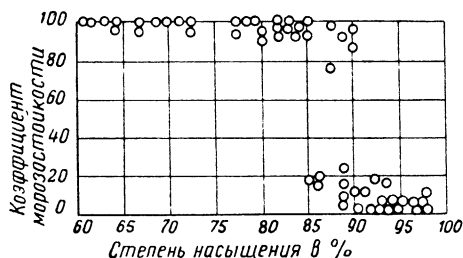


Рис. 7.10. Влияние степени насыщения бетона водой на его морозостойкость



Рис. 7.11. Зависимость между состоянием заполнителей перед замесом и количеством циклов замораживания и оттаивания до достижения 25% потери в весе образцов

1 — 90 сут. влажного хранения; 2 — 14 сут. влажного хранения и 76 сут. воздушного

при применении насыщенного водой крупного заполнителя бетон может разрушиться независимо от содержания в нем вовлеченного воздуха. Если заполнители не насыщены к моменту приготовления бетонной смеси или если они частично обезвоживаются после укладки, а цементный камень имеет замкнутые поры, повторное насыщение происходит с трудом, за исключением длительного нахождения при пониженной температуре.

При повторном увлажнении бетона цементный камень насыщается легче, чем заполнитель, так как вода может проникнуть к заполнителю только через цементный камень, а также потому, что мелкопористый цементный камень обладает большим капиллярным притяжением<sup>2</sup>. Таким образом, цементный камень легче разрушается, но он может быть защищен вовлеченным воздухом.

<sup>1</sup> Бетоны на пористых заполнителях могут обладать сравнительно высокой морозостойкостью [36].

<sup>2</sup> Наблюдения за состоянием бетонных конструкций, изготовленных на различных заполнителях [12], показывают, что пористые водопоглощающие зерна заполнителя, расположенные вблизи наружной поверхности бетона, не могут быть защищены плотным цементным раствором. Они насыщаются водой и разрушаются при замораживании. (Прим. ред.)

Применение воздухововлекающих добавок будет описано ниже; повышение морозостойкости возможно также путем применения бетонных смесей с водоцементным отношением, достаточно низким для получения мелкопористой структуры цементного камня и с малым количеством замерзающей воды. При этом следу-

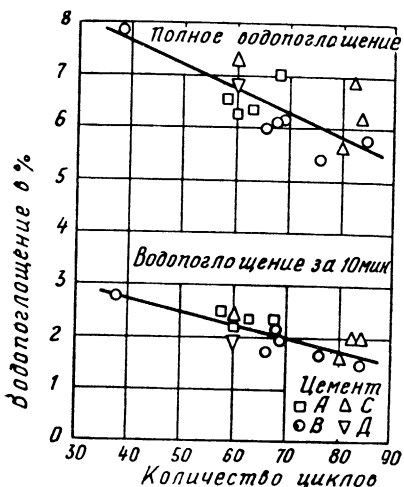


Рис. 7.12. Зависимость между водопоглощением бетона и количеством циклов замораживания и оттаивания, приводящим к 2% потере в весе образцов

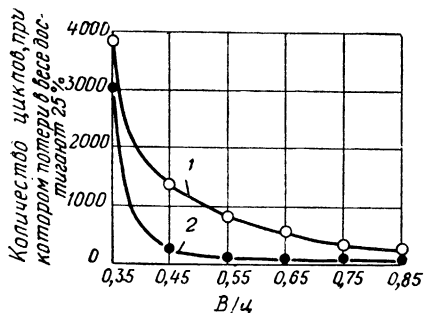


Рис. 7.13. Влияние  $W/C$  на морозостойкость бетона 28-суточного влажного твердения

1 — бетон с воздухововлекающими добавками; 2 — бетон без добавок

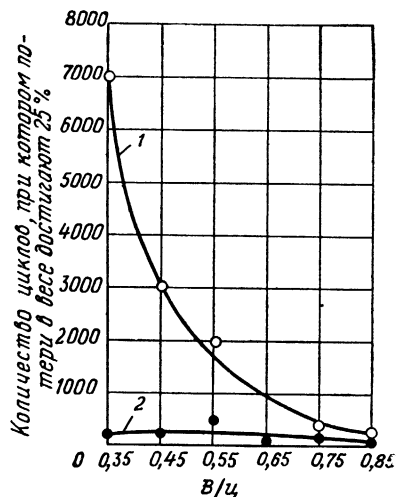


Рис. 7.14. Влияние  $W/C$  на морозостойкость бетона, твердевшего 14 сут. во влажной среде, а затем 76 сут. при относительной влажности 50% (обозначения те же, что и на рис. 7.13)

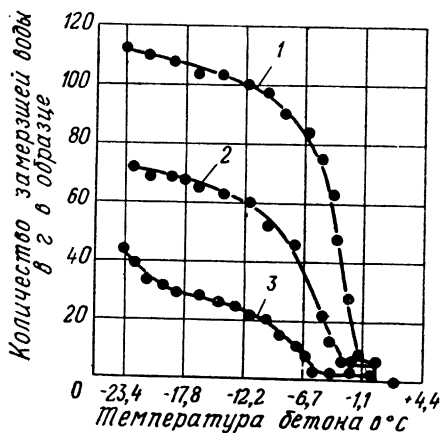


Рис. 7.15. Влияние возраста бетона на содержание замерзшей воды как функции от температуры

возраст: 1 — 3 сут.; 2 — 7 сут.; 3 — 28 сут.

ет, чтобы в основном процесс гидратации прошел до того, как бетон будет подвергнут замораживанию. Такой бетон имеет низкую проницаемость и не поглощает влаги в сырую погоду.

На рис. 7.12 показано влияние водопоглощения бетона на его стойкость при переменном замораживании и оттаивании, а на рис. 7.13 — влияние  $V/C$  на морозостойкость бетона 28-суточного твердения во влажных условиях. Эта закономерность справедлива для бетона с воздухововлекающими добавками и без них, так как  $V/C$  влияет на размер и количество воздушных пор в цементном камне. Влияние  $V/C$  на морозостойкость видно из рис. 7.14.

Таблица 7.5. Максимальное водоцементное отношение для получения морозостойкого бетона в различных условиях

Вид конструкции и условия испытания	Максимальное водоцементное отношение по весу
Бетон испытывался на воздухе без возможности увлажнения (защитный слой бетона у арматуры не менее 3,81—5,08 см) . . . . .	0,7
Бетон в условиях постоянного увлажнения и испытываемый на замораживание . . . . .	0,6
Дорожные плиты, испытываемые в климатических условиях Великобритании . . . . .	0,6
Бордюрные камни . . . . .	0,55
Дорожные плиты, подвергаемые повторяющейся очистке поверхности от льда с помощью соли . . . . .	0,5, но предпочтительнее использование воздухововлекающих добавок

О важности водоцементного отношения для морозостойкости бетона можно судить по практическим рекомендациям, приведенным в табл. 7.5 и 10.5. Имеющиеся данные относятся к бетону, твердевшему при нормальной температуре не менее 7 суток перед замораживанием и не применимы, когда действие мороза сопровождается другими разрушающими воздействиями.

На рис. 7.14 даны также результаты испытаний бетона без воздухововлекающих добавок. Из сопоставления этих результатов с данными рис. 7.13 видно, что высушивание перед замораживанием повышает стойкость бетона с высоким водоцементным отношением, но если  $V/C$  смеси ниже 0,45, преобладающее значение имеет различие в степени гидратации: бетоны с более коротким периодом влажного твердения имеют меньшую морозостойкость. Влияние более полной гидратации определяется снижением содержания в цементном камне воды, которая может замерзнуть. Это показано на рис. 7.15 для бетона с  $V/C=0,41$ . Из графика видно также, что температура замерзания снижается с возрастом вследствие повышения концентрации щелочей в еще замерзшей воде. Во всех случаях небольшое количество воды замерзает при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ , но это, вероятно, свободная вода на поверхности образца. Температура, при которой начинает замерзать капиллярная вода, равна

Таблица 7.6. Морозостойкость бетона с осадкой конуса 20,3 см, приготовленного на различных видах цемента

Содержание цемента в кг/м <sup>3</sup>	Вид цемента в порядке убывания стойкости				
251	V	IV	I	II	III
335	III	V	IV	II	I
251	IV	II	I	III	V

приблизительно  $-1,1^{\circ}\text{C}$  в 3-суточном возрасте,  $-2,8^{\circ}\text{C}$  в 7-суточном и  $-5^{\circ}\text{C}$  — в 28-суточном.

Химический состав цемента и тонкость его помола не влияют на морозостойкость бетона, за исключением раннего возраста, когда эти показатели определяют степень гидратации, а это влияет на прочность цементного камня и количество в нем воды, которая могла бы замерзнуть.

Отсутствие влияния состава цемента было показано натурными испытаниями портландцементной ассоциации США<sup>1</sup>.

В табл. 7.6 приведены типы цементов в бетонных смесях различного состава в порядке убывания их стойкости. Возможное объяснение, что относительная морозостойкость цементов различных видов меняется с изменением водоцементного отношения, не подтверждается нашими знаниями о механизме этого процесса.

Чтобы уменьшить опасность действия мороза, бетон должен быть хорошо уплотнен, поэтому недопустимо применение заполнителей и оборудования, которые обуславливают расслоение бетонной смеси и образование раковин.

Применение очень крупных заполнителей или с большим содержанием лещадных зерен нежелательно, так как возможно образование скоплений воды под нижней поверхностью зерен крупного заполнителя.

Недостаточная морозостойкость бетона независимо от того, что является причиной ее: цементный камень или заполнители, может быть определена при охлаждении образцов ниже точки замерзания и определении изменения объема. Морозостойкий бетон дает усадку при движении воды за счет осмоса из цементного камня в воздушные поры, а неморозостойкий бетон расширяется, как показано на рис. 7.16.

<sup>1</sup> Имеются противоречивые данные по этому вопросу. В ряде экспериментов была установлена связь между морозостойкостью и содержанием трехкальциевого алюмината в цементах [12].  
(Прим. ред.)

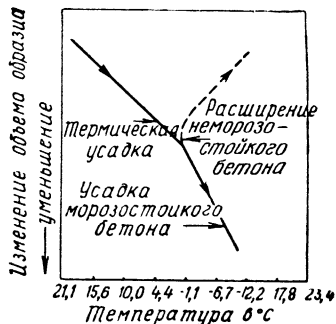


Рис. 7.16. Изменение объема морозостойкого и неморозостойкого бетона при охлаждении

## **ИСПЫТАНИЯ БЕТОНА НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ**

---

Существует четыре метода испытаний по ASTM (С 290—57Т, С 291—57Т, С 292—57Т и С 310—57Т). В этих испытаниях приняты две скорости замораживания, каждая для оттаивания на воздухе и в воде, а также возможно оттаивание в рассоле. Результаты, получаемые при испытаниях, различны: при замораживании в воде насыщенного водой бетона создаются значительно более тяжелые условия испытаний, чем на воздухе. Быстрое замораживание вызывает более быстрое разрушение. Степень насыщения образцов к началу испытаний увеличивает скорость разрушения.

Разрушения от действия мороза можно определить разными способами. Общепринят метод измерения изменений динамического модуля упругости образца. Уменьшение его после определенного количества циклов замораживания и оттаивания свидетельствует о разрушении бетона. Этот метод показывает разрушения от действия мороза раньше, чем их можно заметить визуально или определить другими методами, хотя такое объяснение уменьшения величины модуля после первых же циклов замораживания и оттаивания вызывает сомнение.

Действие мороза может быть установлено также по потере прочности при сжатии и изгибе или по изменению длины или веса образца. Последний способ предпочтительнее, когда разрушения от мороза происходят преимущественно на поверхности образца, но он не пригоден при внутренних повреждениях, где результаты зависят также от размеров образца.

Если испытания должны дать информацию о поведении бетона на практике, условия испытания не должны значительно отличаться от натуральных условий. Трудность заключается в том, что испытания должны быть ускоренными по сравнению с условиями внешней среды, но неизвестно, при какой степени ускорения теряется достоверность результатов испытания. Очевидно, что некоторые ускоренные испытания замораживания и оттаивания приводят к разрушению бетона, который в натуральных условиях имеет удовлетворительную долговечность.

Различие между условиями лабораторных испытаний и реальными условиями заключается в том, что реальные конструкции высыхают во время летних месяцев, а в лаборатории образцы постоянно насыщаются и воздушные поры заполняются водой, что приводит к разрушению бетона. Это ужесточение условий испытания не отражает условий эксплуатации, но способность бетона выдерживать определенное число циклов замораживания и оттаивания — вероятный показатель его высокой долговечности в реальных условиях. Все четыре метода ASTM дают большой разброс при определении среднего уровня долговечности.

### **ВЛИЯНИЕ СОЛЕЙ**

---

В случае дорожных покрытий мороз не только непосредственно влияет на долговечность бетона, но и обуславливает необходимость применения солей, понижающих температуру замерзания воды.

Для этой цели обычно применяют  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$ ; их периодическое воздействие при чередовании замораживания и оттаивания приводит к поверхностному шелушению бетона. Соли создают осмотическое давление и вызывают движение воды к верхней плоскости плиты, на которой она замерзает. Так как наибольшие разрушения наблюдаются при относительно низкой концентрации солей в бетоне (2—4%) (рис. 7.17), Фербек и Клигер считают, что имеет место преимущественно физический, а не химический механизм разрушения. Действительный механизм, в результате которого соли-антиобледенители вызывают шелушение бетона, еще не выяснен.

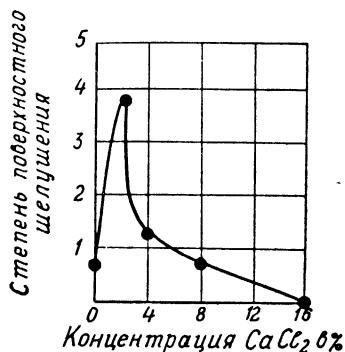


Рис. 7.17. Влияние концентрации  $\text{CaCl}_2$  на шелушение бетона без воздухововлекающих добавок после 50 циклов замораживания и оттаивания (без удаления солевого раствора). Степень поверхностного шелушения меняется от 0 (нет шелушения) до 5 (сильное шелушение)

Применение воздухововлекающих добавок делает бетон значительно более стойким к поверхностному разрушению, но причина этого влияния вовлеченного воздуха еще не установлена.

Многочисленные испытания показали, что степень разрушения меняется в зависимости от условий, в которых действует соль. Например, воздушное твердение бетона перед испытанием (после влажного твердения) повышает его стойкость к поверхностному разрушению. Высушиванию должно обязательно предшествовать влажное хранение, достаточно продолжительное, обеспечивающее гидратацию цемента. Для бетона с воздухововлекающими добавками

период выдерживания, необходимый для обеспечения стойкости к действию солей, тот же, что и для обеспечения прочности бетона при действии нагрузки. Наибольшие разрушения бетона наблюдаются при попеременном замораживании и оттаивании в присутствии раствора-антиобледенителя на поверхности. Если солевой раствор удаляется с поверхности бетона перед повторным замораживанием, поверхностного шелушения не наблюдается даже у бетона без воздухововлекающих добавок.

### **БЕТОН С ВОЗДУХОВОВЛЕКАЮЩИМИ ДОБАВКАМИ**

На Британских островах бетон редко разрушается от мороза не только потому, что там редки продолжительные морозы, но и потому, что, как правило, применяются более жесткие смеси с низким водоцементным отношением, чем, например, в США. Результатом этого является большая морозостойкость.

Рекомендуемые величины максимального  $V/C$  для различных условий эксплуатации приведены в табл. 7.5. В Англии редко проектируют-

ся специальные морозостойкие смеси и мало применяют воздухововлекающие добавки. Бетон с воздухововлекающими добавками имеет ряд преимуществ не только вследствие его долговечности, но и в связи с лучшей удобоукладываемостью, поэтому более широкое применение его в будущем весьма целесообразно.

### **ВОЗДУХОВОВЛЕЧЕНИЕ**

Воздух вовлеченный в бетон при помощи специальных веществ является полезным компонентом. Этот воздух следует отличать от случайно защемленного воздуха. Он отличается по величине образуемых воздушных пор: поры от вовлеченного воздуха имеют размер порядка 0,05 см, а случайно защемленный воздух образует значительно большие поры, почти такие же, как раковины на поверхности бетона.

Вовлеченный воздух образует замкнутые поры в цементном камне вследствие отсутствия сквозных каналов для пропуска воды. Проницаемость бетона не меняется. Поры не заполняются продуктами гидратации цемента, так как гель может образоваться только в воде.

Повышенная морозостойкость бетона с воздухововлекающими добавками была открыта случайно, когда заметили, что при помолу цемента с добавкой гидролизованной крови в качестве интенсификатора помолу бетон получался более долговечным, чем при помолу без интенсификаторов.

Основные группы воздухововлекающих добавок:

а) животные и растительные жиры и масла и их жирные кислоты;  
б) природные древесные смолы, которые, реагируя с известью цемента, образуют растворимые соединения. Смолы могут быть предварительно нейтрализованы  $\text{Na}(\text{OH})$  с образованием водорастворимого мыла (например, винсол);

в) смачивающие вещества, такие, как щелочные соли сульфатов и сульфонов органических соединений (например, дарекс). Существует большое количество фирменных названий воздухововлекающих добавок, но применению их должна предшествовать проверка в бетонной смеси.

Воздухововлекающие добавки обычно образуют устойчивую пену, пузырьки которой не коагулируют. Эта пена не должна оказывать вредного химического действия на цемент. Воздухововлекающие добавки вводятся или в бетонную смесь — непосредственно в бетономешалку или в цемент в определенной пропорции.

Последний способ позволяет ограничено изменять содержание воздуха в смеси, особенно при изменении отношения заполнитель:цемент или при применении различных видов заполнителей. С другой стороны, применение добавок усложняет приготовление бетонной смеси. Добавки составляют 0,005—0,05% веса цемента, но для облегчения дозировки они вводятся обычно в виде водных растворов, так что фактическое количество, с которым приходится обращаться, больше.

Необходим строгий контроль за дозировкой смеси, так как только при определенном количестве вовлеченного воздуха можно получить долговечный бетон с воздухововлекающими добавками.

### СОДЕРЖАНИЕ ВОЗДУХА

Для каждой смеси существует минимальный объем пор, необходимый для обеспечения морозостойкости (рис. 7.18). Клигер считает, что этот объем составляет 9% объема растворной части, имея в виду воздух, содержащийся в цементном камне. Контролирующим фактором является расстояние между пузырьками воздуха, т.е. толщина цементного камня между соседними воздушными порами. Расстояние 0,025 см между порами достаточно для гарантии защиты от мороза (рис. 7.19). Так как общий объем пор в данном объеме бетона определяет прочность бетона, следовательно, воздушные поры должны быть возможно меньшего размера. Их размер в значительной степени определяется процессом пенообразования. На практике поры имеют разные размеры, и их размер обычно определяют удельной поверхностью в  $см^2/см^3$ .

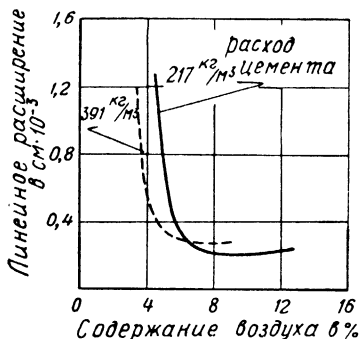


Рис. 7.18. Влияние содержания воздуха в бетоне на его расширение после 300 циклов замораживания и оттаивания

Не следует забывать, что в бетоне всегда есть случайно защемленный воздух независимо от наличия воздухововлекающих добавок, следовательно, имеется два вида пор и удельная поверхность выражает общий объем пор в цементном камне. В хорошо приготовленном бетоне

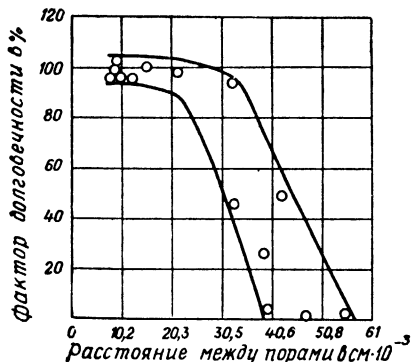


Рис. 7.19. Взаимосвязь долговечности бетона и расположения воздушных пор



Рис. 7.20. Влияние В/Ц на расстояние между порами в бетоне с общим содержанием воздуха 5%



Таблица 7.7. Содержание воздуха при расстоянии между порами 0,025 см

Содержание цемента в бетоне в кг/м <sup>3</sup>	В/Ц	Содержание воздуха в % к объему бетона при удельной поверхности пор в см <sup>-1</sup> , равной				
		138	178	197	237	316
446 392 333	0,35	8,5 7,6 6,4	6,4 5,6 4,8	5 4,4 3,8	3,4 3 2,5	1,8 1,6 1,3
446 392 333 273	0,49	10,2 8,9 7,6 6,4	7,6 6,7 5,7 4,8	6 5,3 4,5 3,8	4 3,5 3 2,5	2,1 1,9 1,6 1,3
446 392 333 273 226	0,66	12,4 10,9 9,3 7,8 6,2	9,4 8,2 7 5,8 4,7	7,4 6,4 5,5 4,6 3,7	5 4,3 3,7 3,1 2,5	2,6 2,3 1,9 1,6 1,3

с воздухововлекающими добавками удельная поверхность пор составляет приблизительно от 1000 до 1500 см<sup>-1</sup>, но иногда может доходить до 2000 см<sup>-1</sup>. Удельная поверхность пор случайно защемленного воздуха составляет менее 760 см<sup>-1</sup>. Размер пор колеблется в пределах 0,005—0,13 см. При данном содержании воздуха в бетоне расстояние между воздушными порами зависит от В/Ц бетонной смеси, как показано на рис. 7.20. Объем воздуха при расстоянии между порами 0,025 см для различных смесей, приведенных в табл. 7.7, принят по данным Пауэрса. Хотя воздух содержится только в цементном камне, количество его выражается в процентах от объема бетона (табл. 7.8).

Таблица 7.8. Рекомендуемые содержания воздуха в бетоне при различной максимальной крупности заполнителя

Максимальный размер зерен заполнителя в см	Общее содержание воздуха в бетоне в %
1,91	6
2,54	5
3,81	4,5
5,08	4
7,62	3,5
15,24	3

Из табл. 7.7 видно, что при определенной величине удельной поверхности пор в жирных смесях объем вовлеченного воздуха должен быть больше, чем в тощих.

Чем жирнее смесь, тем больше удельная поверхность пор при данном содержании воздуха. Например, в реальных составах с максимальной крупностью заполнителя 1,91 см (см. рис. 7.18) были определены следующие значения удельной поверхности пор.

Содержание цемента	Оптимальное содержание воздуха в %	Удельная поверхность пор в $см^{-1}$
224	6,5	130
307	6	166
391	6	229

Объем вовлеченного воздуха в данном бетоне не зависит от объема случайно защемленного воздуха, а зависит только от количества воздухововлекающей добавки. Чем больше введено добавок, тем больше вовлеченного воздуха, но существует предельная величина добавки, выше которой объем пор не увеличивается. На воздухововлечение при данном содержании добавки влияют и другие факторы. Смеси с лучшей удобоукладываемостью содержат больше воздуха, чем жесткие. Увеличение тонкости помола цемента снижает эффективность воздухововлечения, но влияние различных свойств цемента еще не вполне ясно. Гранулометрический состав заполнителя также влияет на объем пор. Этот объем уменьшается при применении очень мелкого песка, а применение песка, просеянного через сито с отверстиями 0,7—0,3 см, повышает содержание вовлеченного воздуха; такое же влияние оказывает применение угловатых заполнителей вместо круглых.

Содержание твердой фазы в бетоне определяет количество вовлеченного воздуха. Каждая воздушная пора окружена граничной пленкой воды, и чем большая поверхность твердой фазы должна быть увлажнена, тем меньше воды остается для заполнения пор.

Содержание воздуха зависит также от времени перемешивания. Если время перемешивания мало, воздухововлекающие добавки недостаточно диспергируются, а при слишком длительном перемешивании часть воздуха удаляется, поэтому существует оптимальное время перемешивания. На практике время перемешивания из технико-экономических соображений принимается обычно меньше минимально необходимого для диспергирования воздухововлекающей добавки, а содержание воздухововлекающих добавок соответственно регулируется. Повышение температуры приводит к увеличению потерь вовлеченного воздуха, так что только меньшая часть его остается в бетоне. Повышение температуры с 10 до 32,2° С снижает наполовину количество вовлеченного воздуха. При вибрировании бетона часть вовлеченного воздуха преимущественно из больших пор удаляется. Продолжительная вибрация приводит к значительной потере воздуха, так что после 3 мин остается только половина его, а после 9 мин — только 20%.

Как было указано выше, цель воздухововлечения — создание морозостойкости бетона. В начальный период замораживания поры воспринимают гидравлическое давление, возникающее в капиллярах цементного камня, а в последующий период замораживания поры препятствуют росту микроскопических кристалликов льда в цементном камне или ограничивают этот рост. Каждая пора защищает только свою тонкую стенку, поэтому при слишком большом расстоянии между порами происходит расширение цементного камня.

Если все стенки пор защищены, цементный камень устойчив к действию мороза, и вследствие поглощения порами свободной воды замерзающий цементный камень уменьшается в объеме при понижении температуры, как и любое твердое тело при охлаждении. При оттаивании вода возвращается из пор в цементный камень, поэтому защитное действие вовлеченного воздуха продолжается при попеременном замораживании и оттаивании. Воздухововлечение повышает также сопротивление бетона разрушающему действию антиобледенителей.

Воздухововлечение влияет и на другие свойства бетона. Наиболее важно его влияние на прочность бетона в любом возрасте. Следует напомнить, что прочность бетона прямо пропорциональна плотности, а поры, образованные вовлеченным воздухом, снижают прочность, как и любые другие поры. На рис. 7.21 показано, что при введении воздухововлекающей добавки в бетонную смесь без изменения ее состава снижается прочность бетона пропорционально объему воздуха в бетоне.

В рассматриваемой области при содержании воздуха до 8%, криволинейная зависимость прочности от пористости не проявляется. Пунктирная кривая на рис. 7.21 показывает зависимость прочности от пористости для случая, когда поры образованы не вследствие воздухововлечения, а из-за неравномерного уплотнения.

Испытания, проведенные для бетонов с  $B/C$  в интервале 0,45—0,72, показали, что потеря прочности, выражаемая как часть прочности бетона без воздухововлечения, не зависит от состава смеси.

Общая потеря прочности на сжатие составляет 5,5% на каждый процент содержания воздуха. Влияние на предел прочности при изгибе значительно меньше. На практике эту потерю прочности не нужно учитывать полностью, так как воздухововлечение положительно влияет на удобоукладываемость бетонной смеси. В результате при одной и той же

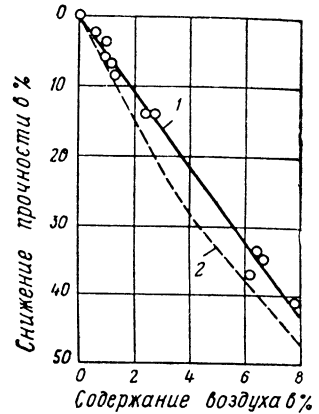


Рис. 7.21. Влияние вовлеченного и заземленного воздуха на прочность бетона

1 — вовлеченный воздух; 2 — воздух, заземленный в результате неполного уплотнения

удобоукладываемости введение воздухововлекающих добавок приводит к уменьшению водоцементного отношения по сравнению с той же смесью без добавок.

В тощих смесях с соотношением заполнитель : цемент 8 или больше, особенно при применении угловатых заполнителей, улучшение удобоукладываемости вследствие воздухововлечения таково, что возможное снижение  $V/C$  полностью компенсирует потерю прочности из-за наличия пор. В массивных конструкциях, где важна не прочность, а тепловыделение цемента, применение воздухововлекающих добавок позволяет перейти на смеси с малым содержанием цемента и, следовательно, с небольшим подъемом температуры. В жирных смесях влияние воздухововлечения на удобоукладываемость меньше,  $V/C$  может быть

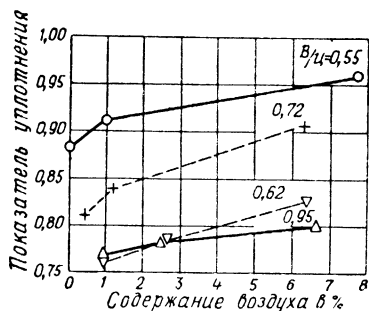


Рис. 7.22. Влияние вовлеченного воздуха на уплотнение бетона (для постоянного состава смеси)

— состав 1 : 6; - - - - - состав 1 : 9

уменьшено незначительно и наблюдается потеря прочности. В общем вовлеченный воздух в количестве 5% повышает показатель уплотнения бетона на 0,03—0,07, а осадку конуса на 1—5 см (рис. 7.22). Воздухововлекающие добавки эффективны также для улучшения удобоукладываемости жестких легобетонных смесей. Причина улучшения удобоукладываемости при применении воздухововлекающих добавок заключается, вероятно, в том, что воздушные поры сохраняющие сферическую форму под действием поверхностного натяжения, выполняют роль мелкого заполнителя с очень малой поверхностью сцепления и значительной упругостью. Вовлеченный воздух придает бетонной смеси свойства смеси с увеличенным количеством мелкого заполнителя,

поэтому при введении воздухововлекающих добавок содержание песка в бетонной смеси должно быть уменьшено. Это позволяет еще уменьшить водосодержание смеси, т. е. компенсировать потерю прочности из-за наличия пор.

Следует заметить, что воздухововлечение влияет на консистенцию или подвижность смеси; она становится более пластичной, так что при одинаковой удобоукладываемости бетонную смесь с воздухововлекающими добавками легче уложить и уплотнить, чем смесь без добавок.

В присутствии воздухововлекающих добавок уменьшается водоотделение: пузырьки воздуха удерживают твердые частицы во взвешенном состоянии, седиментация уменьшается и вода не отделяется. В связи с этим уменьшается проницаемость и отделение цементного молока, а это приводит к повышению морозостойкости поверхностного слоя конструкций.

Иногда отмечают, что воздухововлечение снижает расслоение бетонной смеси. Это верно, так как расслоение при погрузке и транспортировании связано со сцеплением смеси, но расслоение из-за чрезмерной

вибрации все же возможно частично из-за быстрого удаления пузырьков воздуха.

Применение воздухововлекающих добавок уменьшает плотность бетона: цемент и заполнители раздвигаются. Это дает экономический эффект, снижаемый из-за стоимости добавок (хотя и дешевых) и возросшей стоимости технического процесса.

Известен положительный опыт применения воздухововлекающих добавок с сульфатостойким и другими портландцементами, а также при введении  $\text{CaCl}_2$  как ускорителя твердения бетона.

### ИЗМЕРЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОЗДУХА

Существуют три метода определения содержания воздуха в бетонной смеси. Так как при этих испытаниях нельзя отделить вовлеченный воздух от больших пузырьков случайно защемленного воздуха, важно, чтобы испытываемая бетонная смесь была хорошо уплотнена. Самый старый метод — весовой. Он заключается в сравнении плотности бетона, содержащего воздух  $P_a$ , с вычисленной плотностью бетона (без воздухововлечения) того же состава  $P_a$ . Содержание воздуха в процентах от общего объема будет  $1 - \frac{P_a}{P}$ . Этот метод узаконен стандар-

том ASTM C 138—44 и его можно применять при постоянном удельном весе заполнителей и постоянном составе смеси. Ошибка в 1% в вычисленной величине содержания воздуха вполне допустима, что подтверждается опытом определения плотности образцов бетона без воздухововлекающих добавок.

Волюмометрическим методом определяется разность объемов бетонных образцов до и после удаления воздуха. Воздух удаляется при встряхивании и перемешивании в пикнометре или другом сосуде.

Подробно это испытание описано в стандарте ASTM C 173—58. Главная трудность заключается в том, что вес замещающей воздух воды мал в сравнении с общим весом бетона.

Наиболее широко применяют метод давления. Он основан на зависимости между объемом воздуха и приложенным давлением (при постоянной температуре) по закону Бойля. При этом состав смеси и свойства применяемых материалов не имеют значения. При применении воздухомеров не требуется дополнительных расчетов, так как дается прямая градуировка процентного содержания воздуха. Воздухомеры неприменимы при пористых заполнителях. Воздухомер показан на рис. 7.23; определение состоит в измерении уменьшения объема образца бетонной

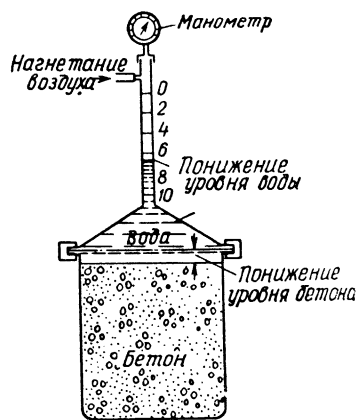


Рис. 7.23. Компрессионный воздухомер

смеси при известном давлении. Давление создается маленьким насосом, например велосипедным, и измеряется манометром. Вследствие повышения давления выше атмосферного объем воздуха в бетоне уменьшается, что приводит к понижению уровня воды над бетоном.

Содержание воздуха устанавливают по изменению уровня воды в калиброванной трубке. Метод описан в стандарте ASTM C 231—56T и является наиболее точным методом определения содержания воздуха в бетоне. Содержание воздуха в затвердевшем бетоне измеряют также на полированных шлифах под микроскопом с использованием метода подсчета длины хорд или с применением воздухомера высокого давления.

### **ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНА**

Хотя тепловые свойства бетона и не связаны прямо с долговечностью, но они определяют поведение бетона в различных условиях и играют большую роль при проектировании массивных конструкций. Поэтому тепловые свойства бетона должны быть указаны в проекте.

Например, в проекте здания должна быть оговорена степень изоляции; в плитах не должно появляться температурных трещин и деформаций, при изменениях температур температурные напряжения, возникающие в статически неопределимых системах, должны быть рассчитаны; в массивных бетонных конструкциях должно быть определено возможное повышение температуры вследствие гидратации цемента и предусмотрена система охлаждения.

Тепловые свойства бетона характеризуют следующие показатели: теплопроводность, перенос тепла (термодиффузия), удельная теплоемкость и коэффициент термического расширения. Первые три взаимосвязаны.

### **ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ**

Теплопроводность — это способность материала проводить тепло, измеряемая количеством тепла, проходящего в течение 1 ч через квадратный метр поверхности тела толщиной 1 м при разности температур 1°.

Теплопроводность обычного бетона зависит от его состава и составляет для насыщенного водой бетона от 1,1 до 2,9 ккал/м<sup>2</sup>·ч·град/м.

Плотность не влияет на теплопроводность обычного бетона, но вследствие низкой теплопроводности воздуха, теплопроводность легкого бетона изменяется в зависимости от плотности. Некоторые величины теплопроводности приведены в табл. 7.9.

Может быть сделан вывод, что минералогический состав заполнителя значительно влияет на теплопроводность бетона. В общем следует сказать, что базальт и трахит имеют низкую теплопроводность, доломит и известняк — среднюю, а кварц — самую высокую, что зависит также от направления теплового потока относительно ориентации кристаллов. Степень насыщения бетона играет важную роль, так как теплопроводность воздуха ниже, чем воды. Например, в легком бетоне повышение

Таблица 7.9. Величины теплопроводности бетона

Заполнители	Плотность бетона в кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность в ккал/м <sup>2</sup> ·ч·град/м
Бариты . . . . .	3180	1,1
Изверженные породы . . . . .	2230	1,14
Доломиты . . . . .	2240	2,94
Легкие . . . . .	420	0,11
Бетон (высушенный) . . . . .	1540	0,48

влажности на 10% вызывает увеличение теплопроводности почти в два раза.

С другой стороны, теплопроводность воды вдвое меньше, чем цементного камня, поэтому чем меньше содержание воды в смеси, тем выше теплопроводность затвердевшего бетона. Теплопроводность в малой степени зависит от температуры, исключение составляют легкие бетоны. Теплопроводность обычно определяют по теплопереносу (термодиффузии), так как его легче измерить. Но возможно также прямое определение теплопроводности.

### ТЕПЛОПЕРЕНОС

Теплоперенос — это скорость, с которой может меняться температура внутри тела. Она определяется из уравнения

$$\delta = \frac{K}{CP},$$

где  $K$  — теплопроводность;  $C$  — удельная теплоемкость;  $P$  — плотность бетона.

Из этого выражения видно, что теплопроводность пропорциональна теплопереносу. В обычном бетоне величина теплопереноса колеблется в пределах 0,002—0,006 м<sup>2</sup>/ч в зависимости от вида применяемого заполнителя. Следующие горные породы приведены в порядке возрастания теплопереноса: базальт, риолит, гранит, известняк, долерит (крупнокристаллический базальт) и кварцит.

Измерение теплопереноса состоит в измерении отношения между временем и разностью температур внутри образца и на его поверхности при постоянной начальной температуре, когда изменение температуры происходит на поверхности.

Метод измерения и расчета дан в стандарте США СРД С 36—48. Так как влажность бетона влияет на его тепловые свойства, теплоперенос следует определять на образцах, влажность которых соответствует влажности бетона в реальных конструкциях.

## УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Удельная теплоемкость, выражающая теплоемкость бетона, мало зависит от вида заполнителя, но заметно увеличивается с повышением влажности бетона. Удельная теплоемкость зависит также от уровня температуры. Для обычных бетонов ее значения в пределах  $0,19—0,26$  ккал/кг·град.

Удельная теплоемкость бетона определяется обычными физическими методами.

## КОЭФФИЦИЕНТ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

Величина коэффициента термического расширения бетона зависит от состава бетонной смеси и влажности в период изменения температуры. Цементный камень и заполнитель имеют разные коэффициенты термического расширения, а коэффициент термического расширения бетона отражает соотношение материалов в составе бетона.

Коэффициент термического расширения цементного камня колеблется в пределах от  $10 \times 10^{-6}$  до  $18,3 \times 10^{-6}$  на  $1^\circ \text{C}$ . Он больше, чем у заполнителя. Коэффициент термического расширения бетона зависит от количества заполнителя в смеси (табл. 7.10) и коэффициента расширения заполнителя. Влияние последнего видно из рис. 7.24; в табл. 7.11 приведены величины коэффициентов термического расширения бетонов состава 1 : 6 на различных заполнителях.

Таблица 7.10. Влияние содержания заполнителя на коэффициент термического расширения бетона

Цемент : песок	Коэффициент термического расширения образцов в возрасте двух лет $\times 10^{-6}$ на $1^\circ \text{C}$
Чистый цемент . . . . .	17,2
1 : 1 . . . . .	12,5
1 : 3 . . . . .	10,3
1 : 6 . . . . .	9,3

Влияние влажности обусловлено составляющими цементного камня и определяется тем, что коэффициент термического расширения складывается из двух частей: действительного кинетического термического коэффициента и давления набухания.

Последнее увеличивается с уменьшением капиллярного давления воды в цементном камне при повышении температуры. Набухание невозможно, если образец сухой, т. е. не содержит воды, и если он насыщен. Следовательно, при этих двух предельных состояниях коэффициент термического расширения меньше, чем при частичном насыщении.



Таблица 7.11. Коэффициенты термического расширения бетонов состава 1 : 6 на различных заполнителях

Заполнитель	Коэффициент термического расширения бетона $\times 10^{-6}$ на $1^\circ\text{C}$		
	воздушное хранение	водное хранение	воздушно-влажное хранение
Гравий . . . . .	12,2	11,35	10,8
Гранит . . . . .	8,85	8	7,15
Кварцит . . . . .	11,8	11,35	10,8
Долерит . . . . .	8,85	7,8	7,35
Песчаник . . . . .	10,8	9,35	8
Известняк . . . . .	6,85	5,7	5,5
Цементный камень . . . . .	6,85	5,7	6
Доменный шлак . . . . .	9,85	8,5	8,2
Шлаковая пемза . . . . .	11,5	8,5	7,8

Из рис. 7.25 видно, что для цементного камня в раннем возрасте максимальные значения коэффициента термического расширения получены при относительной влажности 70%. С увеличением возраста образцов величина относительной влажности, при которой значения коэффициента расширения максимальны, уменьшается и для об-

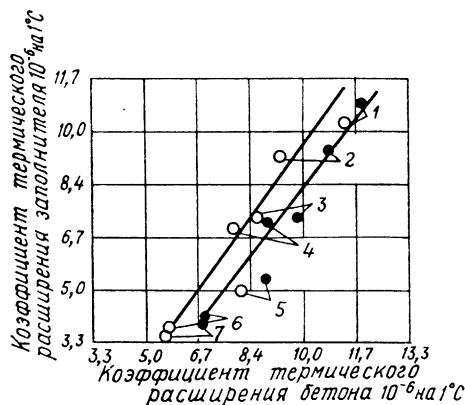


Рис. 7.24. Влияние коэффициента термического расширения заполнителя на коэффициент термического расширения бетона состава 1 : 6

● — воздушное твердение; ○ — водное твердение; 1 — кварцит; 2 — песчаник; 3 — доменный шлак; 4 — долерит; 5 — гранит; 6 — известняк; 7 — цементный камень

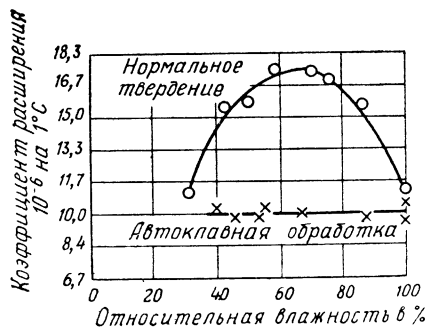


Рис. 7.25. Зависимость коэффициента линейного термического расширения цементного камня нормального твердения и после автоклавной обработки от влажности окружающей среды

разцов, твердевших длительные сроки, она составляет около 50% (рис. 7.26). Величина коэффициента расширения также уменьшается с возрастом из-за снижения возможного давления набухания вследствие увеличения кристаллической составляющей в затвердевшем цементном камне. Таких изменений величины коэффициента термическо-

го расширения не наблюдается после автоклавной обработки, так как в цементном камне нет геля (см. рис. 7.25).

На рис. 7.25 и 7.26 приведены данные для цементного камня. В бетоне мы наблюдаем те же зависимости, хотя коэффициент термического расширения меняется меньше, так как только цементный камень реагирует на изменение влажности и возраст. В табл. 7.11 приведены значения коэффициентов термического расширения бетона состава 1 : 6, твер-



Рис. 7.26. Коэффициент линейного термического расширения цементного камня в разном возрасте

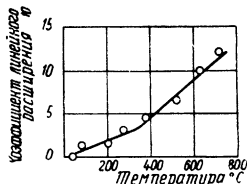


Рис. 7.27. Линейное расширение бетона при нагревании ( $B/C=0,4$ , заполнитель — известняк)



Рис. 7.28. Зависимость между коэффициентом линейного термического расширения бетона и количеством циклов нагрева и охлаждения, необходимым для снижения величины предела прочности при изгибе на 75%

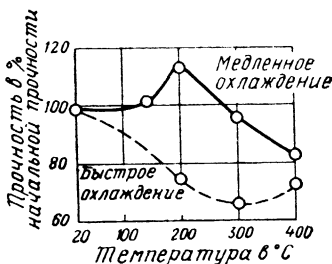


Рис. 7.29. Влияние скорости охлаждения на прочность бетона, изготовленного на заполнителе — песчанике — и предварительно нагретого до различной температуры

дешего на воздухе при 64%-ной относительной влажности, в воде и увлажненного после воздушного твердения.

Только величины, определенные на насыщенных и высушенных образцах, дают действительные значения коэффициента термического расширения, но величины при промежуточных значениях влажности необходимы, так как они отражают реальные условия эксплуатации бетона. Если повышение температуры при переходе от зимы к лету сопровождается высыханием, появляется усадка и чистое расширение меньше, чем при отсутствии потери бетоном воды.

Химический состав и тонкость помола цемента влияют на величи-

Таблица 7.12. Значения коэффициента термического расширения бетона (на гравии) при высоких температурах

Условия хранения	В/Ц	Расход цемента в кг/м <sup>3</sup>	Заполнитель	Коэффициент термического расширения $\times 10^{-4}$ на 1° С в возрасте			
				28 суток		90 суток	
				ниже 260° С	выше 427° С	ниже 260° С	выше 427° С
Влажные	0,4	436	Известняк	7	18,8	6	10,3
	0,6	308		11,8	19	7,8	20,8
	0,8	246		10,2	19,5	15,5	30,3
Воздушные, влажность 50%	0,4	436	»	7,1	17,5	11,3	19,2
	0,6	308		7,1	19,5	8,2	18,7
	0,8	246		8,8	19,2	10,8	20
Влажный воздух	0,68	356 356	Вспученный шлак	5,7 4,3	7 9	— 4,7	— 8,2

ну коэффициента термического расширения лишь постольку, поскольку они влияют на свойства в раннем возрасте. Наличие воздушных пор влияния не оказывает.

Все сказанное относится к нормальным температурам ниже 40° С.

Более высокие температуры могут встречаться, например, в аэродромных покрытиях при действии отходящих газов реактивных двигателей и в производственных условиях. На рис. 7.27 показано, что при температуре выше 320° С коэффициент термического расширения бетона возрастает, возможно, вследствие дегидратации цементного камня. Значения коэффициента термического расширения приведены в табл. 7.12.

Лабораторные испытания показали, что бетоны с большим коэффициентом термического расширения менее стойки к изменениям температуры, чем бетоны с меньшим значением коэффициента расширения. На рис. 7.28 показаны результаты испытаний бетона, подвергнувшегося повторному нагреванию и охлаждению в интервале температур 4,4—60° С со скоростью 2,4° в минуту. Однако коэффициент термического расширения не может служить количественной характеристикой долговечности бетона, подвергающегося частым или быстрым изменениям температуры.

Но более быстрое изменение температуры, чем в обычных условиях, может вызвать разрушение бетона. На рис. 7.29 показано влияние быстрого охлаждения после нагревания до указанной температуры.

### ОГНЕСТОЙКОСТЬ БЕТОНА

Огонь вызывает высокие температурные градиенты, и в результате горячие поверхностные слои отделяются от более холодной внутренней массы.

Образование трещин наблюдается в местах швов, в плохо уплотненных частях бетона или в местах расположения арматурных стержней. Арматура, проводя тепло, усиливает действие нагревания.

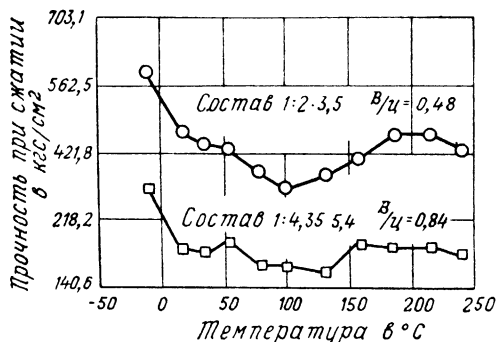


Рис. 7.30. Прочность на сжатие бетона после нагревания до различных температур (заполнитель — известняк)

Понижение теплопроводности бетона улучшает его огнестоек, чем обычный.

Бетоны, изготовленные на известняковом заполнителе или песчанике, меняют цвет с изменением температуры (рис. 7.31). Это изменение происходит постепенно, поэтому максимальную температуру во время пожара можно установить в последующем по цвету заполнителя. Остаточную прочность также можно оценить приблизительно по цвету бетона: бетон, цвет которого изменился до розового, стоек, а имеющий серый цвет — обычно хрупкий и пористый.

Большое количество информации о поведении бетона при высоких температурах получено в результате исследования ядерных реакторов и установок для управляемых снарядов, но эти данные не публикуются<sup>1</sup>.

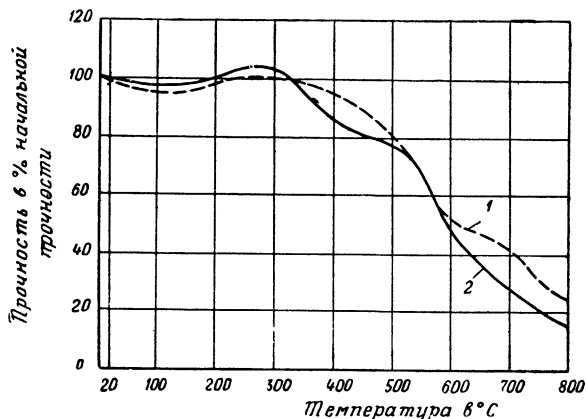


Рис. 7.31. Прочность бетона на сжатие после нагревания до высоких температур (при температуре более 1200°С бетон желтеет)

1 — заполнитель известняк; 2 — заполнитель гравий

<sup>1</sup> Исследования жароупорных бетонов в СССР ведутся К. Д. Некрасовым и его школой [34, 57]. (Прим. ред.)

## **ИСПЫТАНИЕ ЗАТВЕРДЕВШЕГО БЕТОНА**

---

Как было показано, свойства бетона зависят от времени и условий внешней среды, поэтому испытания бетона следует проводить в определенных условиях. Наиболее часто затвердевший бетон испытывают на прочность при сжатии, из-за простоты этого испытания и ввиду того, что многие, хотя и не все, проектируемые характеристики бетона качественно зависят от его прочности, а главным образом большого значения прочности бетона при сжатии в конструкции.

Испытания на прочность можно разделить на механические испытания с разрушением бетона и неразрушающие, последние дают возможность повторять испытания на одном и том же образце, что позволяет изучать изменение свойств бетона во времени.

Разрушающие методы испытаний бетона применяются в течение многих лет, но общепринятого стандартного метода испытаний нет. В разных странах, а иногда в одной и той же стране применяют различные методы и приборы. Поскольку многие из этих методов являются лабораторными, принятыми в научных исследованиях, необходимо знать влияние методов испытаний на прочность бетона.

Результаты испытаний бетона трудно интерпретировать однозначно, поэтому их обычно рассматривают, опираясь на опыт.

### **ИСПЫТАНИЕ НА СЖАТИЕ**

---

Испытания на сжатие проводят на образцах бетона трех видов: кубах, цилиндрах и призмах. Кубы применяются в Англии, Германии и многих других европейских странах, цилиндры — в США, Канаде, Австралии и Новой Зеландии. В Скандинавии испытания проводят на кубах и цилиндрах, во Франции применяют кубы и прямоугольные призмы.

### **ИСПЫТАНИЕ КУБОВ**

В научно-исследовательских работах в настоящее время преимущество отдается цилиндрам, а не кубам, но для сравнения этих двух типов образцов необходимо детально рассмотреть разные методы испытаний.

Образцы для испытаний, изготавливаемые в стальной или чугунной кубической форме размером  $15 \times 15 \times 15$  см,\* должны приближаться к форме куба, иметь определенные размеры и правильные плоскости с минимальными отклонениями. Желательно, чтобы во время изготовления образца форма плотно прилегала к основанию во избежание утечки раствора. Жесткое соединение формы с основанием необходимо при уплотнении бетона вибрированием.

Перед сборкой формы ее поверхности покрывают минеральным маслом; тонкий слой этого масла должен быть нанесен и на внутренние поверхности формы для предупреждения сцепления между формой и бетоном.

По стандарту BS 1881 : 1952, форму заполняют в три слоя. Рекомендуется заполнять форму через укрепленную над ней воронку, тогда форма заполняется с верхом и после уплотнения избыток бетона срезают стальной линейкой и поверхность заравнивают мастерком. Такой метод заполнения дает более однородный бетон, чем при заполнении без воронки.

Каждый слой бетона уплотняют не менее чем 35 ударами стальной ручкой трамбовки площадью  $6,5$  см<sup>2</sup>. Трамбование нужно продолжать до получения достаточного уплотнения, так как бетон в кубе должен быть полностью уплотненным, чтобы показать при испытаниях на сжатие свойства полностью уплотненного бетона. Если же требуется определить свойства уложенного бетона, то степень уплотнения бетона в кубе должна соответствовать степени уплотнения бетона в конструкции. В случае испытания сборных элементов, уплотняемых на вибростоле, нужно вибрировать кубы и элементы конструкций одновременно; однако различие объемов бетона в конструкции и образце чрезвычайно затрудняет получение одинаковой степени уплотнения и данный метод применять не рекомендуется. Уплотнение стандартных кубов электрическим или пневматическим мологом допускается стандартом BS 1881 : 1952.

После окончательной обработки поверхности куба мастерком его оставляют на сутки при температуре  $14,5$ — $19^\circ$  С и относительной влажности не менее 90%. К концу этого периода форму разбирают и куб помещают в воду при той же температуре. Таков стандартный метод обработки по BS 1881 : 1952 для лабораторных условий, а в более широких температурных границах — и на строительстве, где требуется определение потенциальных качеств бетона. Конечно, бетон в конструкции может быть более низкого качества, чем в образцах, вследствие недостаточного уплотнения, расслоения или неправильной обработки. Влияние последнего фактора особенно интересно знать, если нужно определить, когда следует снимать опалубку или давать нагрузку на конструкции. Для этой цели кубы оставляют твердеть при условиях, максимально близких к условиям, существующим в конструкции. Но и при этом температура и влажность в образце будет не такой, как в большой массе бетона; в таких случаях рекомендуется проводить испытания на более крупных образцах.

\* В СССР стандартные образцы имеют форму куба с ребром 20 см.

Возраст, в котором испытываются контрольные образцы в условиях эксплуатации, определяется тем, какие данные требуется получить. С другой стороны, стандартные образцы испытывают в определенном возрасте, обычно через 28 суток, а дополнительные испытания проводят через 3 и 7 суток.

При испытании на сжатие кубы помещают на испытательной машине так, чтобы положение куба во время испытаний было перпендикулярно его положению при изготовлении. В соответствии с BS 1881:1952, давление на куб создают порядка  $140 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{мин}$ . Поскольку связь напряжения и деформации в бетоне при высоких напряжениях нелинейна скорость возрастания деформации должна увеличиваться к моменту разрушения, т. е. скорость движения опорной плиты испытательной машины должна возрастать. Этого можно достичь только с помощью машины с гидравлическим управлением. Прочность на сжатие обычно определяется с точностью до  $3,5 \text{ кгс/см}^2$ , более точное определение проводить трудно.

### ИСПЫТАНИЕ ЦИЛИНДРОВ

Стандартный цилиндр имеет диаметр 15,2 и длину 30,5 см и изготавливается обычно в стальной или чугунной форме, желательнее с закрепленным основанием. Иногда применяют формы из строительного картона, предназначенные для однократного использования, но их применение снижает прочность на несколько процентов, вероятно, вследствие растяжения формы во время схватывания бетона.

Цилиндрические образцы делают так же, как и кубы, но уплотняют их либо тремя слоями с помощью трамбовки диаметром 1,6 см, либо двумя слоями с помощью глубинного вибратора. Подробности этой процедуры описаны в стандарте ASTM C 192—57. Верхнюю поверхность цилиндра выравнивают мастерком, она недостаточно гладка для испытания, а поэтому требует дальнейшей подготовки; в этом заключается главный недостаток таких образцов.

Чтобы ликвидировать это неудобство, Таулов предложил метод отливки цилиндра в специальной форме, состоящей из цилиндра, кольца с ручкой, верхней и нижней плит и скобы (рис. 8.1). Кольцо укрепляют на опалубке сверху, после чего собранная форма заполняется и утрамбовывается обычным путем. Цилиндр помещают на деревянное основание (шпунты в нижней плите вдавливаются в дерево) и бетон уплотняют дополнительно при ударах свободно падающей ручки о стенку формы;

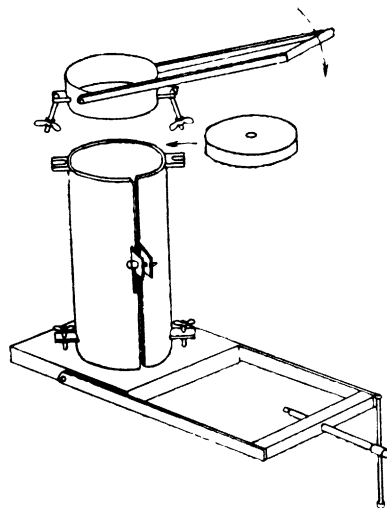


Рис. 8.1. Цилиндрическая форма Таулова

число ударов определяется в зависимости от осадки конуса. После окончания уплотнения кольцо снимают, срезают сверху избыток бетона и круговыми движениями вставляют верхнюю плиту, которую закрепляют скобой. После этого образец кладут горизонтально, причем щель должна быть расположена сверху, и слегка постукивают, чтобы получить хорошее прилегание бетона к плитам. При таком положении цилиндра торцевые поверхности образца становятся плоскими и расположенными под прямым углом к оси цилиндра, т. е. пригодными для испытания. Водоотделение при этом происходит только под щелью формы и поэтому мало влияет на прочность при сжатии. Таулов показал, что этот метод дает надежные результаты, однако Блоэм установил, что испытания цилиндра, уложенного в горизонтальном положении, дают уменьшение прочности на 15% по сравнению с прочностью цилиндров, уложенных стандартным способом.

### ИСПЫТАНИЕ ПРИЗМ

Бетонный образец, который имеет примерно то же соотношение между высотой и площадью поперечного сечения, что и цилиндр, но в котором легче получить пригодные для испытаний поверхности, — это прямоугольная призма с квадратным поперечным сечением, применяемая во Франции. Призмы изготавливают в горизонтальном положении так, что они испытываются, как и кубы, при действии нагрузки перпендикулярно к плоскости формования. Раньше считали, что положение образца при испытании по сравнению с положением его при формовании влияет на прочность бетона, однако недавно было показано, что прочность от этого не зависит, если не произошло расслоения смеси или избыточного водоотделения. Эти условия соблюдаются в любой хорошо приготовленной смеси.

Во Франции обычно применяют призмы размерами  $7 \times 7 \times 35$  и  $10 \times 10 \times 50$  см.

### ИСПЫТАНИЯ, ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ИСПЫТАНИЯМ КУБОВ

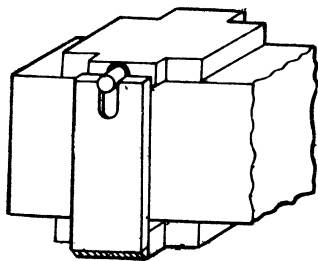


Рис. 8.2. Приспособление для испытаний эквивалентных кубов

Иногда прочность бетона на сжатие определяют на кусках балок, испытанных на изгиб. После разрушения от изгиба концы балок остаются целыми, а поскольку балка обычно имеет квадратное сечение, то можно получить как бы «эквивалентный», или «модифицированный куб», приложив давление через квадратные стальные плиты такого же размера, как поперечное сечение балки. Необходимо, чтобы две плиты точно располагались одна над другой; такое приспособление показано на рис. 8.2. Образец следует помещать таким образом, чтобы



поверхность балки, которая была сверху при ее изготовлении, не соприкасалась ни с одной из плит.

Прочность модифицированного куба приблизительно такая же, как и прочность стандартного куба того же размера: практически же мы наблюдаем незначительное повышение предела прочности, поэтому по стандарту BS 1881 : 1952 принимают, что прочность модифицированного куба в среднем на 5% выше, чем прочность стандартного куба тех же размеров.

### ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ

При испытании на сжатие торцевые поверхности цилиндра соприкасаются с плитами испытательной машины. Поскольку эти поверхности (за исключением метода Таулова) не формируются, а обрабатываются мастерком, то они обычно довольно грубы и недостаточно ровны. При этом создаются концентрации напряжений и фактическая прочность бетона существенно снижается. Отклонение от ровной горизонтальной поверхности на 0,025 см может снизить прочность на  $\frac{1}{3}$ . Выпуклые торцевые поверхности приводят к большему снижению прочности, чем вогнутые, так как они обычно создают большие концентрации напряжений. Потери прочности особенно велики в высокопрочном бетоне.

Чтобы избежать потери прочности, следует создавать ровные торцевые поверхности: по стандарту ASTM C 192—57 необходимо, чтобы торцевые поверхности цилиндра отклонялись от плоскости не более чем на 0,005 см (проверяют линейкой и щупом). Для получения такой поверхности обычно необходим выравнивающий слой (подливка). Такие же требования предъявляются обычно и к плитам испытательной машины (BS 1881 : 1952).

На контактных поверхностях не должно быть также зерен песка или других инородных тел, оставшихся от предыдущих испытаний, которые могут вызвать преждевременное разрушение образца и даже в отдельных случаях его раскалывание.

Существуют два способа преодоления вредного воздействия неровных торцевых поверхностей образца: подливка и прокладки.

Прокладки в настоящее время применяют редко, так как они приводят к значительному снижению средней прочности бетона по сравнению с подливкой или даже с образцами, заглаженными мастерком. В то же время разброс прочности сильно уменьшается, так как ликвидируется влияние дефектов поверхности, обычно вызывающих большие изменения прочности.

Снижение прочности, вызванное применением прокладок, для которых обычно применяют картон или свинец, является результатом поперечных деформаций, возникающих в цилиндре под влиянием действия коэффициента Пуассона в материале прокладки. Коэффициент Пуассона в материале прокладки обычно выше, чем в бетоне, что ведет к раскалыванию. Влияние прокладок аналогично, но обычно больше влияния

смазки торцов цилиндра для устранения сцепления между образцом и плитами, препятствующего поперечному расширению бетона. Было установлено, что такая смазка снижает прочность образца.

Подливка соответствующим материалом не влияет на прочность и уменьшает ее разброс по сравнению с неподлитым образцом. Идеальный подливочный материал должен иметь прочность и упругость такие же, как бетон, тогда не возникает раскалывания и создается достаточно

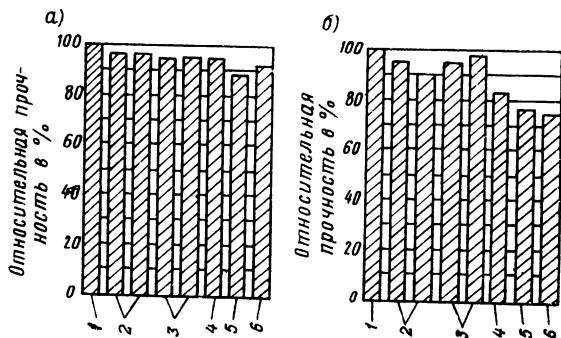


Рис. 8.3. Влияние материала прокладки на прочность бетонов

а — бетон низкой прочности; б — высокопрочный бетон; прокладка: 1 — из глиноземистого цемента; 2 — из гипсовой штукатурки; 3 — из серной смеси; 4 — из серы; 5 — из гипса; 6 — из гипса с портландцементом

однородное распределение деформаций по поперечному сечению образца.

Подливка может осуществляться как перед самыми испытаниями, так и вскоре после изготовления образца. В каждом из этих случаев применяют различные материалы, но независимо от этого необходимо, чтобы этот слой был тонким, желательно не толще 0,16—0,32 см. Материал для подливки должен иметь прочность не меньшую, чем бетон в образце

слишком большая разница в прочности нежелательна, так как очень прочная подливка может создать большое поперечное упрочнение и таким образом привести к увеличению прочности. Влияние материала подливки на прочность сказывается сильнее в бетонах высокой или средней прочности, чем в бетоне низкой прочности; в последнем случае подливка редко вызывает снижение прочности больше, чем на 5—10% (рис. 8.3).

Если подливку необходимо произвести вскоре после изготовления, то применяют чистый цемент. Желательно подождать 2—4 ч после изготовления, чтобы успели произойти пластическая усадка бетона и оседание верхней поверхности в форме. Удобно обрабатывать первоначально полученный бетон на расстоянии 0,16—0,32 см от верхнего края формы. При подливке это пространство заполняется цементным тестом, которое дает усадку, а затем обрабатывается стеклянной или гладкой стальной пластиной до получения гладкой поверхности. Успешное выполнение этой операции и получение хорошего контакта между цементным тестом и плитой требует навыка. Улучшению контакта помогает смазка плиты смесью свиного сала и парафина или нанесение на нее тонкого слоя графитной смазки.

Другой метод заключается в устройстве подливки незадолго до начала испытаний; точное время этой операции зависит от способности материала подливки к затвердеванию. Подходящими для подливки материалами являются глиноземистый цемент, смесь портландцемента и гли-

ноземистого цемента, высокопрочный медицинский гипс, расплавленная серная смесь и другие материалы.

Глиноземистый цемент затвердевает в течение 8—18 ч, и его следует применять на влажных образцах, так как сухой бетон впитывает часть воды, что приводит к высушиванию и растрескиванию подливки, которую необходимо увлажнять.

Лермит применял смеси трех частей портландцемента с двумя частями глиноземистого цемента, с водоцементным отношением 0,3 и получал через 7 ч достаточную прочность. Медицинский гипс затвердевает в течение 1 ч, и, поскольку он к моменту применения имеет консистенцию вязкой жидкости, удается получить гладкую плоскую поверхность при затвердевании материала подливки на стеклянной плите, покрытой абсорбирующей бумагой (например, газетной), для предупреждения сцепления. Алебастр для этой цели не годится, так как он имеет довольно низкую прочность и должен быть высушен; при этом образец приходится выносить из камеры влажного твердения. В то время как алебастр твердеет, бетон теряет влагу.

Серная смесь состоит из серы и наполнителя, например измельченного шамота. Смесь наносится в расплавленном состоянии и затвердевает вместе с образцом в форме. При этом получается плоская квадратная торцевая поверхность. Серную смесь можно применять повторно.

Другим методом является шлифовка опорных поверхностей образца. Этот метод дает очень хорошие результаты, но довольно дорог.

### ИСПЫТАНИЕ ОБРАЗЦОВ НА СЖАТИЕ

Торцевые поверхности цилиндра должны быть не только плоскими, но и перпендикулярными к его оси, что гарантирует их параллельность. Допускаются небольшие отклонения, так как было показано, что изменение наклона оси цилиндра к оси испытательной машины от 0,6 до 30,5 см не вызывает потери прочности.

Ось образца, помещенного в машину для испытаний, должна быть как можно ближе к оси плиты, но ошибка на величину до 0,6 см не влияет на прочность. Точно так же некоторое отклонение от параллельности торцевых поверхностей цилиндра не снижает прочности при условии, что испытательная машина снабжена сферической опорой, как рекомендуется стандартом BS 1881 : 1952.

Сферическая опора действует не только в начальный момент при соприкосновении поверхностей образца с плитами пресса, но также и при нагружении. В процессе нагружения некоторые участки образца могут деформироваться сильнее, чем другие. Это наблюдается, например в кубе, где в результате водоотделения свойства разных его слоев различны. В рабочем положении куб расположен под прямым углом к тому положению, в котором он был изготовлен, поэтому более слабые и более прочные участки (параллельные друг другу) распределяются от одной до другой плиты. Под нагрузкой бетон, модуль упругости которого ниже, деформируется больше. Сферическая опора позволяет сохранить равномерную нагрузку на весь куб, и разрушение наступает в мо-

мент, когда деформирующая сила достигает уровня прочности наиболее слабых участков образца. С другой стороны, если плита не меняет своего наклона под нагрузкой (т. е. движется параллельно самой себе), то прочные участки куба выдерживают большую нагрузку. Более слабые участки и в этом случае разрушаются первыми, но максимальная нагрузка на куб достигается только тогда, когда наиболее прочные участки также получают максимальную нагрузку. Таким образом, в этом случае общая нагрузка на куб будет больше, чем при наличии свободно вращающейся плиты. Эти данные были экспериментально подтверждены Таррантом.

Испытательные машины, применяемые для испытаний бетона на сжатие, имеют сферическую опору, но она не действует под нагрузкой, если применяют обычную смазку ее шарнирной поверхности. Однако, если применяется высокополярный смазочный материал, то коэффициент трения может быть снижен до 0,04 (по сравнению с 0,5 при применении простой минеральной смазки) и при этом возможно некоторое вращение плит во время испытаний. Неясно, однако, приводит ли эта подвижность плиты к определению наиболее характерной для испытываемого бетона прочности. Есть данные, что машина с плитами, не имеющими возможности изменять положение под нагрузкой, дает более воспроизводимые результаты при испытании номинально одинаковых кубов. Во всяком случае наблюдаемая прочность значительно изменяется в зависимости от силы трения поверхности шарнира, поэтому для получения сравнимых результатов следует поддерживать поверхность шарнира в стандартном состоянии.

Описание разных типов испытательных машин не входит в содержание данной книги, но следует отметить, что разрушение образца зависит от конструкции машины и особенно от ее мощности. При очень жесткой конструкции машины большая деформация образца под нагрузкой, приближающейся к максимальной, не сопровождается движениями траверсы машины, так что скорость приложения нагрузки уменьшается и фиксируется более высокая прочность. С другой стороны, в менее жестких машинах нагружение больше приближается к кривой «нагрузка — деформация» образца; когда начинается разрушение, энергия, заключенная в машине, быстро высвобождается. Это приводит к разрушению под меньшей нагрузкой, чем в более жестких машинах, в которых разрушение часто сопровождается сильным взрывом. В каждом случае это зависит от детальных характеристик испытательной машины.

#### РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ПРИ СЖАТИИ

Выше рассматривалось разрушение бетона, подвергнутого одноосному сжатию. Однако при испытании на сжатие подразумевается более сложная система нагрузки, при которой между торцевыми поверхностями образца бетона и прилегающими к ним стальными плитами испытательной машины развиваются тангенциальные силы. В каждом материале действующее вертикальное сжатие (номинальная нагрузка на образец) ведет к поперечному расширению благодаря действию коэффициента Пуассона. Но модуль упругости стали в 5—15 раз, а коэффициент

Пуассона не более чем в два раза превышают соответствующие значения для бетона, поэтому поперечное напряжение в плитах невелико по сравнению с поперечным расширением бетона, если он мог бы свободно перемещаться.

При этом может быть отмечено, что плита удерживает поперечное расширение бетона в участках образца, расположенных вблизи его концов: степень задержки зависит от фактически имеющегося трения. Если устранить трение, например покрыв слоем графита или парафина несущие поверхности, то в образце бетона наблюдается большое поперечное расширение и иногда он раскалывается по всей длине.

При действии силы трения, т. е. при нормальных условиях испытания, элементы образца подвергаются не только сжатию, но и сдвигающему усилию. Величина последнего уменьшается, а поперечное расширение увеличивается по мере увеличения расстояния от плит. В результате ограничения расширения в испытываемом на разрушение образце имеется относительно неповрежденный конус или пирамида высотой около  $\frac{\sqrt{3}}{2} d$  (где  $d$  — поперечный размер образца). Но если образец длиннее, чем примерно  $1,7d$ , то часть его не будет испытывать ограничивающего действия плит пресса. Отметим, что образцы длиной менее  $1,5d$  показывают значительно более высокую прочность, чем образцы большей длины.

По-видимому, при действии сдвигающего усилия в дополнение к одноосному сжатию разрушение образца происходит позднее, и, следовательно, можно сделать вывод, что не только главная деформирующая сила сжатия вызывает раскалывание и последующее разрушение, но что здесь действует также поперечная деформация при растяжении. Само разрушение может быть результатом разрушения сердцевины образца. Поперечное напряжение вызывается также действием коэффициента Пуассона, и если принять, что этот коэффициент равен приблизительно 0,2, то поперечное напряжение составит  $\frac{1}{5}$  осевого напряжения сжатия. В настоящее время мы не имеем точных критериев разрушения бетона, но имеются указания, что разрушение происходит при предельной деформации 0,002—0,004 на сжатие или 0,0001—0,0002 на растяжение. Поскольку отношение второго из этих показателей к первому меньше, чем коэффициент Пуассона для бетона, из этого следует, что условия разрушения на периферийных участках достигаются раньше, чем будет достигнуто предельное напряжение сжатия.

В многочисленных испытаниях цилиндров наблюдали вертикальное раскалывание, особенно в высокопрочных образцах, из раствора или чистого цементного теста, поскольку крупный заполнитель препятствует образованию трещин в поперечном направлении.

Наличие вертикальных трещин подтверждено также измерениями скорости распространения ультразвуковых импульсов вдоль и поперек образца.

Эти данные не снижают ценности испытания на сжатие как метода сравнения, но не следует расценивать полученные результаты как истинную меру прочности бетона на сжатие.

## ВЛИЯНИЕ ОТНОШЕНИЯ ВЫСОТЫ К ДИАМЕТРУ НА ПРОЧНОСТЬ

Стандартные цилиндры имеют высоту  $h$  в два раза больше диаметра  $d$ , но иногда применяют и образцы с другими пропорциями. В частности, это относится к случаям, когда берут керны из бетона конструкции: диаметр зависит от размеров прибора для высверливания образца, а высота керна варьирует в зависимости от толщины плиты или элемента конструкции. Если образец слишком длинный, то его можно довести до отношения  $h/d=2$  до начала испытания: при слишком коротком образце необходимо привести прочность бетона к ее значению, как если бы она определялась на образце с отношением  $h/d=2$ .

Стандарты ASTM 42—57 и BS 1881 : 1952 дают поправочный коэффициент (табл. 8.1), однако Мэрдок и Кеслер показали, что поправка зависит также от уровня прочности бетона (рис. 8.4). На высокопрочный бетон меньше влияют соотношение размеров образца и его форма (табл. 8.2); эти два фактора следует связывать между собой, так как существует сравнительно небольшая разница между прочностью куба и прочностью цилиндра при одинаковом отношении  $h/d$ .

*Таблица 8.1. Стандартные поправочные коэффициенты для прочности цилиндров с различным отношением высоты к диаметру*

Отношение высоты к диаметру ( $h/d$ )	Поправочный коэффициент прочности	
	ASTM 42—57	BS 1881 : 1952
2	1	1
1,75	0,98	0,97
1,5	0,96	0,95
1,25	0,94	0,92
1,1	0,9	0,9
1	0,85	0,89

Влияние прочности на коэффициент пересчета имеет практическое значение в случаях низкопрочного бетона, если испытываемый образец имеет отношение  $h/d$  менее 2. Применяя поправочные коэффициенты ASTM 42—57 или BS 1881 : 1952, можно пересчитать прочность, которая была бы получена при  $h/d=2$ .

Общий вид влияния отношения  $h/d$  на прочность показан на рис. 8.5. Для величин  $h/d$  меньше 1,5 измеряемая прочность быстро возрастает вследствие ограничения расширения плитами испытательной машины. Если отношение  $h/d$  варьирует в пределах 1,5—4, то влияние его на прочность невелико, а для значений отношения  $h/d$  между 1,5 и 2,5 прочность образца находится в пределах 5% от прочности стандартного образца ( $h/d=2$ ). Для величин  $h/d$  выше 5 прочность падает быстрее и влияние отношения  $h/d$  становится очевидным.

Таким образом, ясно, что отношение высоты к диаметру равно 2,

является наиболее подходящим, так как незначительные отклонения от этого отношения не оказывают большого влияния на измеряемую величину прочности.

Влияние отношения высоты образца к наименьшему поперечному размеру на прочность относится также к призмам.

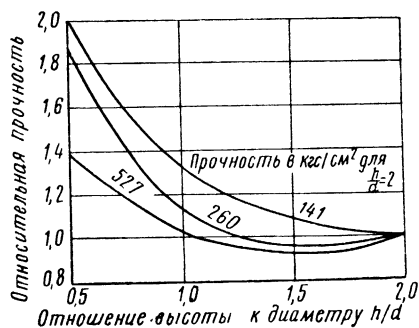


Рис. 8.4. Влияние отношения высоты к диаметру на прочность цилиндра для различных уровней прочности

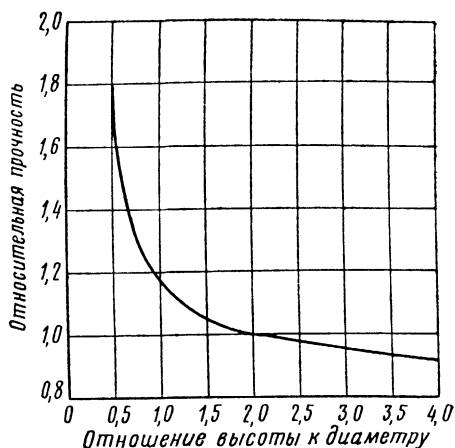


Рис. 8.5. Общий вид влияния отношения высоты к диаметру на прочность цилиндра

Влияние этого отношения на прочность легкого теплоизоляционного бетона, по-видимому, значительно меньше, чем в обычном бетоне возможно, вследствие открытой текстуры и наличия больших пустот.

### СРАВНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ КУБОВ И ЦИЛИНДРОВ

Уже отмечалось, что стягивающее действие плит испытательной машины распространяется по всей высоте куба, но оставляет незатронутым часть испытываемого цилиндра. Следовательно, можно ожидать, что прочности кубов и цилиндров, сделанных из одного и того же бетона, различаются между собой.

В соответствии с BS 1881 : 1952 прочность цилиндра равна  $\frac{3}{4}$  прочности куба, но опытным путем было доказано, что не имеется единой взаимосвязи между прочностью образцов этих двух видов. Отношение прочности цилиндра к прочности куба зависит прежде всего от прочности бетона, и оно тем выше, чем выше прочность бетона, как показано по данным Эванса в табл. 8.2. Лермит предложил представить отношение прочностей цилиндра и куба в следующем виде:

$$0,76 + 0,2 \lg \frac{\sigma_{\text{куб}}}{2,84},$$

где  $\sigma_{\text{куб}}$  — кубиковая прочность в кгс/см<sup>2</sup>. Однако некоторые вторич-

Таблица 8.2. Прочность кубов и цилиндров

Прочность на сжатие в кгс/см <sup>2</sup>		Отношение прочности цилиндра к прочности куба	Разница в прочности (куб — цилиндр) в кгс/см <sup>2</sup>
куб	цилиндр		
91	70	0,77	21
154	119	0,77	35
203	154	0,76	49
252	203	0,81	49
280	245	0,87	35
294	266	0,91	28
301	273	0,91	28
364	322	0,89	42
371	350	0,94	21
427	371	0,87	56
448	413	0,92	35
490	448	0,91	42
532	511	0,96	21

ные факторы могут влиять на прочность этих двух типов образцов в разной степени: например, чем более крупный заполнитель, тем ниже отношение прочности цилиндра к прочности куба при постоянном расходе цемента и удобоукладываемости. Причины этого неясны, но наблюдения показывают, что отношение между прочностями цилиндра и куба не является простой функцией одной только прочности. Влажность образца в момент испытаний, как было показано, также влияет на отношение прочностей двух типов образцов.

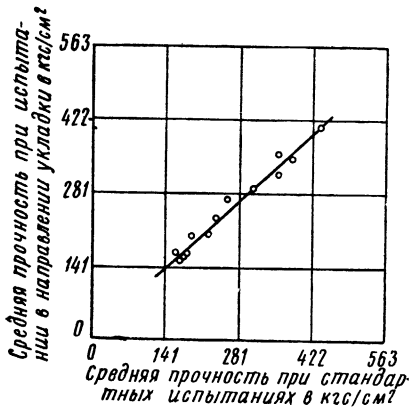


Рис. 8.6. Отношение средней прочности бетонных кубов при нагружении в направлении формования и стандартным способом

Трудно сказать, какой из этих типов лучше, но имеется тенденция, во всяком случае в научных исследованиях, применять чаще цилиндры, чем кубы, что рекомендовано и РИЛЕМ — Международной организацией испытательных лабораторий. Считают, что цилиндры дают более однородные результаты для номинально одинаковых образцов, так как их разрушение меньше зависит от напряжения на концах образца; их прочность также

меньше зависит от свойств применяемого в смеси крупного заполнителя; распределение деформирующего напряжения по горизонтальным плоскостям цилиндра более однородно, чем в образцах с квадратным поперечным сечением.



Можно упомянуть и тот факт, что цилиндры изготавливают и испытывают в одном положении, тогда как в кубах линия действия нагрузки находится под прямым углом к оси куба. При сжатии элементов конструкций имеются подобные условия, как и в испытываемом цилиндре, поэтому было предложено считать испытания цилиндра более всего соответствующими реальным условиям. Однако было показано, что направление приложения нагрузки при испытании перпендикулярно или вдоль направления укладки куба не оказывает значительного влияния на прочность, если куб сделан из нерасслаивающегося и однородного бетона (рис. 8.6). Более того, распределение деформирующего напряжения при испытании на сжатие таково, что данное испытание является только сравнительным и не дает количественной информации о прочности элемента конструкции.

### **ИСПЫТАНИЕ НА ИЗГИБ**

Хотя бетон обычно не предназначен для работы на растяжение, важно знать величину его прочности на растяжение для оценки нагрузки, при которой начнется образование трещин. Отсутствие трещин чрезвычайно важно для сохранения непрерывности бетонной конструкции и во многих случаях для предупреждения коррозии арматуры. Проблема трещинообразования возникает, например, при применении высокопрочной стальной арматуры или при развитии диагональных напряжений, возникающих при действии сдвигающей силы, но наиболее частой причиной трещинообразования являются задержка усадки и температурные градиенты. Оценка прочности бетона на растяжение помогает понять поведение железобетона, хотя при фактических расчетах при проектировании во многих случаях не принимают во внимание прочность на растяжение.

Прямое приложение растягивающей силы, без эксцентриситета, создать трудно; кроме того, оно осложняется и вторичными напряжениями, создаваемыми, например, захватами или забетонированными стержнями, хотя недавно было показано, что с некоторым успехом приложение прямого растяжения может быть достигнуто с использованием принципа клещей.

Ввиду этих трудностей предпочтительно измерять прочность бетона на растяжение путем изгиба неармированного прямого бетонного бруса. Теоретическое максимальное растягивающее напряжение, которое создается в нижних волокнах испытываемой балки, известно под названием предела прочности при изгибе. Определение «теоретическое» относится к предположению, что напряжение пропорционально расстоянию от нейтральной оси балки. Известно, что форма эпюры напряжений, близких к разрушающим, не является треугольной. Таким образом, предел прочности при изгибе превышает прочность бетона на растяжение и дает более высокое значение прочности, чем то, которое могло бы быть получено при прямом растяжении образцов, сделанных из того же бетона. Тем не менее данное испытание очень полезно, особенно в связи с проектированием дорожных плит и взлет-

но-посадочных дорожек на аэродромах, так как напряжение при изгибе является здесь критическим фактором.

Величина предела прочности на изгиб зависит от размеров балки и более всего от условий нагружения. Применяются две системы: центральная нагрузка посреди пролета, которая дает треугольное распределение изгибающего момента с максимальным напряжением только в одном сечении балки, и симметричная нагрузка в двух точках, создающая постоянный изгибающий момент между двумя точками. При применении последнего метода часть нижней поверхности балки — обычно  $1/3$  пролета — подвергается максимальному напряжению и критическое трещинообразование может начаться в любой части

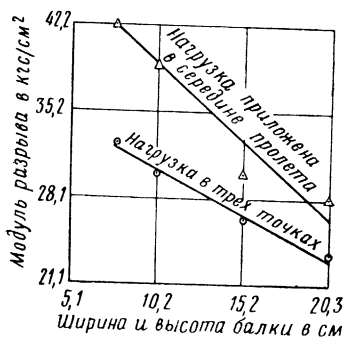


Рис. 8.7. Предел прочности при изгибе балок различного размера при центральном нагружении и нагружении в трех точках

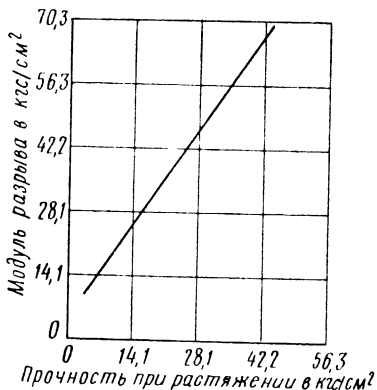


Рис. 8.8. Связь между пределом прочности при изгибе и прочностью при осевом растяжении

пролета, недостаточно прочной, чтобы выдержать напряжение. С другой стороны, при центрально приложенной нагрузке разрушение обычно происходит только при ослаблении прочности волокон, расположенных под точкой приложения нагрузки. Это утверждение не является строгим, так как при напряжении в волокнах, меньшем, чем в балке, может также произойти разрушение. Однако можно видеть, что вероятность наличия слабого элемента (с любой удельной прочностью), подвергающегося критическому напряжению, значительно выше при нагрузке в двух точках пролета, чем при центральной нагрузке. Поскольку бетон состоит из элементов с различной прочностью, как было показано выше, можно ожидать, что нагрузка, приложенная в двух точках, даст более низкие значения предела прочности при изгибе. Эти различия можно видеть из данных Райта, представленных на рис. 8.7.

BS 1881 : 1952 предписывает приложение нагрузки в третях пролета для балок размером  $15,2 \times 15,2 \times 71,1$  см с пролетом между опорами 61 см; при максимальном размере заполнителя не более 1,9 см можно применять и балки размером  $10 \times 10 \times 51$  см с пролетом 40,5 см.

Имеются три возможные причины, по которым испытание предела

прочности при изгибе дает более высокое значение прочности, чем прямое растяжение, определяемое на том же бетоне. Первая связана с предположением о форме эпюры напряжений, упоминавшейся выше. Вторая причина — это случайное отклонение от центра при испытании на прямое растяжение, что приводит к более низкой прочности бетона. Третья основана на том же факторе, что и влияние способа приложения нагрузки на величину предела прочности при изгибе: при прямом растяжении весь объем образца подвергается максимальному напряжению, так что вероятность наличия слабого элемента выше. На рис. 8.8 показана связь между прочностью при прямом растяжении и пределом прочности при изгибе, но фактические значения могут изменяться в зависимости от свойств смеси.

Требования стандарта ASTM C 78—57 аналогичны требованиям стандарта BS 1881 : 1952. Если разрушение происходит в центральной трети балки, то предел прочности при изгибе вычисляется на основе теории упругости и равен  $\frac{PL}{bd^2}$ , где  $P$  — максимальная деформирующая нагрузка на балку;  $L$  — пролет;  $b$  — ширина балки;  $d$  — толщина балки.

Но если разрушение происходит вне точек приложения нагрузки, например на расстоянии  $a$  от ближайшей опоры, причем  $a$  измеряется вдоль центральной оси балки, тогда предел прочности при изгибе равен  $\frac{3Pa}{bd^2}$ . Это означает, что максимальное напряжение в критическом сечении, а не максимальное напряжение на балку увеличивается в расчетах. Как английские, так и американские стандарты указывают, что испытания, при которых разрушение происходит в сечении, где  $\frac{L}{3} - a > 0,005 L$ , не следует учитывать.

Балки обычно испытывают в том же положении, в каком они были изготовлены, но если бетон не расслоился, то испытание балки в другом положении по сравнению с первоначальным не влияет на предел прочности при изгибе.

### ИСПЫТАНИЕ НА РАСКАЛЫВАЕМОСТЬ

Непрямой метод приложения растяжения в форме раскалывания был предложен Фернандо Карнейро в Бразилии, поэтому этот метод испытания часто называют бразильским, хотя независимо от этого он был разработан и в Японии. При этом испытании бетонный цилиндр такого же вида, как и применяемый при испытании на сжатие, горизонтально помещается между плитами испытательной машины и нагрузка увеличивается до того момента, когда цилиндр разрушается путем раскалывания по вертикальному диаметру. Если нагрузка действует по образующей, то элементы вертикального диаметра цилиндра (рис. 8.9) подвергаются вертикальному сжатию

$$\frac{2P}{\pi LD} \left[ \frac{D^2}{r(D-r)} \right]^{-1}$$

и горизонтальному растяжению  $\frac{2P}{\pi LD}$ , где  $P$  — сила сжатия, действующая на цилиндр;  $L$  — длина цилиндра;  $D$  — диаметр цилиндра;  $r$  и  $(D-r)$  — соответственно расстояния рассматриваемого элемента от двух точек приложения нагрузок.

Однако сразу после приложения нагрузки возникает высокое напряжение сжатия, поэтому между цилиндром и плитами машины кладут узкие полоски прокладки, например фанеры. Эти полоски обычно имеют толщину 0,3 см, а ширину их удобно делать равной  $\frac{1}{12}$  диаметра

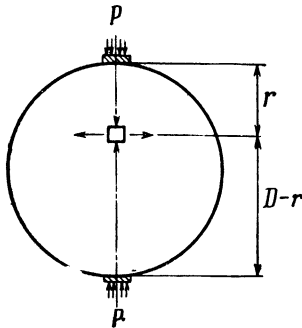


Рис. 8.9. Испытание на раскалываемость

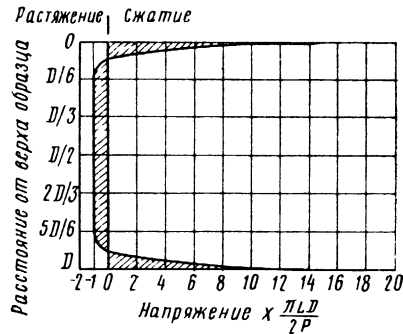


Рис. 8.10. Распределение горизонтального усилия в цилиндре при нагрузке, приложенной на ширину, равную  $\frac{1}{12}$  диаметра

ра цилиндра. При этом горизонтальное напряжение на сечение, имеющее вертикальный диаметр, равно показанному на рис. 8.10. Напряжение выражается величиной  $\frac{2P}{\pi LD}$  и видно, что вблизи приложения нагрузок существует высокое горизонтальное напряжение сжатия.

Однако, поскольку оно сопровождается вертикальным напряжением сжатия такого же порядка, создавая таким образом двухосное напряжение, разрушения при сжатии не происходит. Результаты испытаний различных бетонов на раскалывание показаны на рис. 8.11.

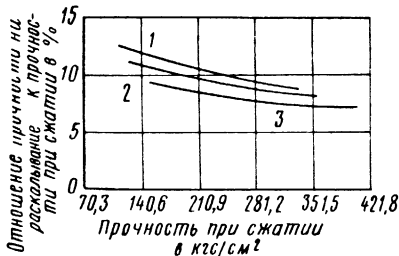


Рис. 8.11. Прочность на растяжение при раскалывании в цилиндрах с различной прочностью на сжатие

по данным: 1 — Дании и Норвегии; 2 — Японии; 3 — Бразилии

**Таблица 8.3. Разброс результатов испытаний  
при определении прочности бетона на растяжение**

Вид испытания	Средняя проч- ность в $кгс/см^2$	Стандартное откло- нение в замесе в $кгс/см^2$	Коэффициент вариации в %
Испытание на раскалывае- мость . . . . .	20,35	1,4	5
Испытание на прямое растя- жение . . . . .	19,25	1,33	7
Испытание на изгиб . . . . .	42,35	2,52	6
» » сжатие куба	418,6	14,5	3,5

шину к возможному нарушению параллельности образующих цилиндра. Кубы также можно испытывать на раскалываемость, причем груз прилагается в этом случае через полуцилиндрические накладки на куб, однако имеется очень мало данных по характеристикам этого испытания.

Испытание на раскалываемость производится просто и дает более воспроизводимые результаты, чем другие испытания на растяжение (табл. 8.3). Считают, что прочность, определяемая при этом испытании, более близка к истинной прочности на растяжение бетона, чем при определении предела прочности при изгибе. Другим преимуществом испытания на раскалываемость является то, что по крайней мере в тех странах, где принято измерение прочности на сжатие цилиндров, изготовленных в металлической опалубке, один и тот же тип образца бетона можно применять при испытаниях как на сжатие, так и на растяжение.

### **ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПРИЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА**

В пределах скоростей, с которыми производится нагружение образца, скорость приложения нагрузки значительно влияет на определяемую прочность бетона: чем меньше скорость, с которой возрастает напряжение, тем ниже определяемая прочность. Это может быть результатом увеличения напряжения во времени вследствие ползучести, а при достижении предельного напряжения разрушение происходит независимо от величины прилагаемого напряжения. Нагружение в течение 30—240 мин вызывает разрушение при 84—88%-ной предельной прочности, полученной в случае, когда нагружение происходило со скоростью около  $2,1 \text{ кгс/см}^2/\text{сек}$ .

Бетон может бесконечно выдерживать напряжения, составляющие до 70% прочности при нагружении с указанной выше скоростью.

На рис. 8.12 представлены результаты испытаний, произведенных различными исследователями, здесь можно видеть, что увеличение скорости приложения нагрузки с  $0,007$  до  $7 \times 10^5 \text{ кгс/см}^2/\text{сек}$  увеличивает определяемую прочность бетона вдвое. Однако эти данные не были

подтверждены Эвансом, который не отметил влияния скорости нагрузки при скоростях ниже  $7 \times 10^2 \text{ кгс/см}^2/\text{сек}$ ; его данные включены в рис. 8.12.

Рост прочности при более быстром нагружении увеличивается пропорционально уменьшению содержания цемента в смеси. Ниже приведены данные Эванса, полученные при уменьшении времени нагружения с 0,1 до 0,002 сек.

Отношение заполнитель: цемент	Увеличение прочности в %
3	17
10	28
14	31
18	35

Эти результаты были получены при применении испытательных машин со сжатым воздухом. При применении обычных лабораторных машин практические границы скоростей приложения нагрузки лежат между 0,7 и  $7 \text{ кгс/см}^2/\text{сек}$ , и в этих пределах — определяемая прочность колеблется от 97 до 103% прочности при  $2,1 \text{ кгс/см}^2/\text{сек}$ .

Последнее значение является обычным и наиболее близким к скорости  $2,31 \text{ кгс/см}^2/\text{сек}$  ( $140 \text{ кгс/см}^2/\text{мин}$ ), указанной в стандарте BS 1881 : 1952. Стандарт ASTM C 39—56 Г предписывает скорость 1,4— $3,5 \text{ кгс/см}^2/\text{сек}$ , но по обоим стандартам разрешается приложение половины указанной нагрузки при скорости, превышающей стандартную, так как скорость приложения нагрузки в течение первой половины испытаний не влияет на конечную прочность.

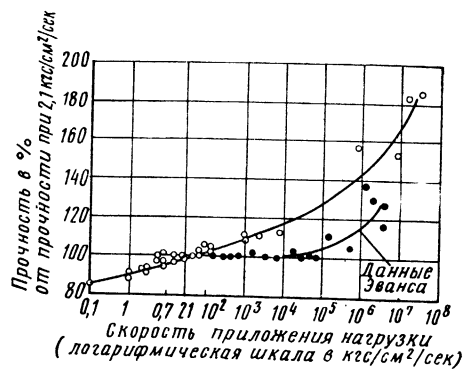


Рис. 8.12. Влияние скорости приложения нагрузки на прочность бетона на сжатие

Ясно, что для сравнимости результатов испытаний напряжение должно быть приложено со стандартизированной скоростью. В современных испытательных машинах это обеспечивается шаговыми дисками. По мере приближения момента разрушения образца поток гидравлической жидкости к цилиндру машины может резко возрасти, так как скорость деформации бетона становится очень высокой. Это обычно применяется в Англии, но стандарт ASTM C 39—56Г указывает, что «не следует производить никакой регулировки управления испытательной машины, когда образец бетона быстро оседает перед разрушением». При таких условиях отмечается несколько более низкая проч-

ность, чем прочность, которая могла бы быть получена по методу BS 1881 : 1952.

Результаты испытаний на изгиб зависят от скорости нагружения так же, как и при испытании на сжатие. Испытания Райта показывают, что рост скорости увеличения напряжений с 1,4 до 79,8 кгс/см<sup>2</sup>/мин увеличивает предел прочности при изгибе примерно на 15%. Имеется линейная зависимость между пределом прочности при изгибе и логарифмом скорости приложения нагрузки; она аналогична зависимости при напряжении сжатия (см. рис. 8.12). BS 1881 : 1952 предписывает скорость приложения нагрузки 7 кгс/см<sup>2</sup>/мин, а стандарт ASTM C 78—57 дает скорость не более 10,5 кгс/см<sup>2</sup>/мин.

### ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ

Предел прочности при изгибе высохшего бетона ниже, чем этот же показатель в бетоне, находящемся в насыщенном состоянии. Эта разница является следствием растягивающих напряжений, вызванных ограниченной и неоднородной усадкой до приложения нагрузки. Величина видимой потери прочности зависит от скорости, с которой влага испаряется с поверхности бетона.

Однако если испытываемый образец невелик по размеру и высыхание происходит медленно, так что внутренние напряжения могут перераспределяться и уменьшаться вследствие ползучести бетона, то наблюдается увеличение прочности. Это было показано при испытаниях растворных образцов и бетонных балок. Увлажнение же сухих образцов бетона до проведения испытания снижает их прочность.

Прочность образцов, испытываемых на сжатие, также увеличивается при высыхании. Это весьма интересно, так как при сжатии, как и при растяжении бетона создаются трещины растяжения под нагрузкой, так что влияние высушивания должно было бы быть одинаковым. В прошлом, однако, при испытаниях балок на изгиб они часто высушивались неоднородно и получались противоречивые данные о влиянии высыхания на прочность бетона.

Миллс предположил, что потеря прочности вследствие увлажнения в бетоне, испытываемом на сжатие, вызывается расширением цементного геля адсорбированной водой: силы сцепления твердых частиц при этом уменьшаются. Наоборот, если при высыхании уменьшается расклинивающее действие воды, то наблюдается явное увеличение прочности бетона. Вода действует не только в поверхностном слое. Это подтверждается тем, что погружение образца в воду гораздо меньше влияет на его прочность, чем пропитывание водой. С другой стороны, пропитывание бетона бензином или парафином, которые, как известно, не адсорбируются цементным гелем, не влияет на прочность. Повторное увлажнение высушенных образцов бетона снижает его прочность до прочности бетона, постоянно твердевшего во влажных условиях, если оба вида бетона гидратированы в одинаковой степени [8.32]. Таким образом, изменение прочности бетона вследствие высыхания является обратимым.

Количественный эффект высыхания меняется: при прочности бетона на  $350 \text{ кгс/см}^2$  отмечалось увеличение прочности на сжатие до 10% после тщательного высушивания, но если период высыхания был меньше 6 ч, то это увеличение обычно не превышало 5%. Высушивание цилиндров, применяемых при испытании на раскалываемость, приводит к пропорционально большому изменению прочности.

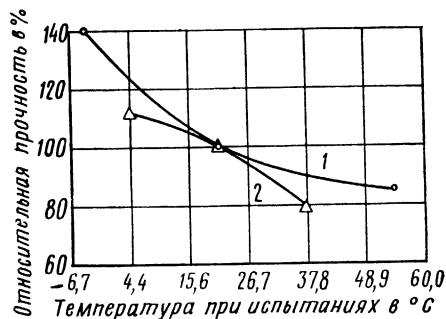


Рис. 8.13. Влияние температуры в момент испытаний на прочность

1 — прочность при сжатии; 2 — прочность при изгибе

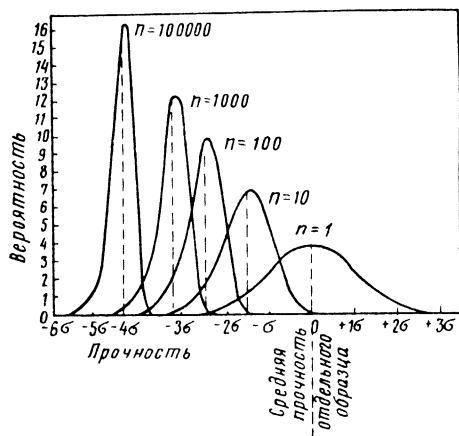


Рис. 8.14. Распределение прочностей в образцах размера  $n$  для кривой нормального распределения. На ординатах указан приблизительный процент образцов, прочность которых лежит в пределах интервала 0,1

уменьшается с возрастанием размеров образца, а также изменчивость прочности номинально одинаковых образцов. Поскольку влияние размеров образцов на прочность зависит от стандартного отклонения прочности (рис. 8.14), следовательно, влияние размера на прочность тем меньше, чем больше однородность бетона.

Выше обсуждалась концепция о наиболее слабом звене; для применения этой концепции необходимо знать распределение предельных

В соответствии с BS 1881 : 1952 кубы и образцы, испытываемые на изгиб, следует испытывать тотчас после извлечения из воды. В этом случае результаты получаются более воспроизводимыми, чем при «сухих условиях», которые могут быть весьма разнообразными.

Температура образца бетона в момент испытаний (в отличие от температуры твердения) влияет на прочность, причем более высокая температура ведет к более низкой прочности как в случае сжатия, так и при испытаниях на изгиб (рис. 8.13).

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ОБРАЗЦА НА ПРОЧНОСТЬ**

### ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ОБРАЗЦА НА ПРОЧНОСТЬ

Поскольку бетон состоит из элементов с различной прочностью, как было показано выше, разумно предположить, что чем больше объем подвергаемого нагрузке бетона, тем более вероятно, что он содержит элементы с данной предельной (низкой) прочностью. В результате этого измеряемая прочность бетона



величин в образцах данного размера, полученных методом случайной выборки из первоначального множества образцов с данным распределением прочности. Это распределение обычно неизвестно, и поэтому необходимо сделать некоторые допущения относительно его формы. В данном случае достаточно применить данные Типпета о вариациях прочности и стандартном отклонении образцов размера  $n$ , выраженные в единицах прочности и стандартного отклонения образца, принятого за единицу, если этот образец имеет нормальное распределение прочностей. На рис. 8.14 показаны такие вариации прочностей для образцов, размеры которых  $n$  эквивалентны  $10$ ,  $10^2$ ,  $10^3$  и  $10^5$ .

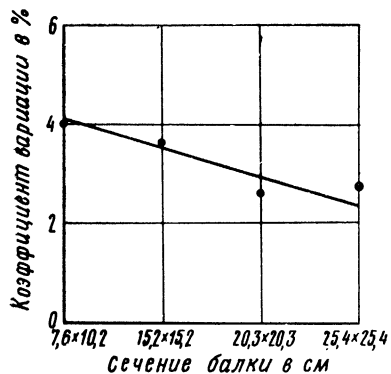


Рис. 8.15. Коэффициент вариации предела прочности при изгибе балок разных размеров

Таблица 8.4.

Стандартное отклонение в кубах различных размеров [8.18]

Группа	Стандартное отклонение в кгс/см <sup>2</sup> в кубах размером		
	7 см	12,7 см	15,2 см
A	27,9	21,2	14,1
B	15,3	11,3	9,8
C	14,7	10,5	9,8
D	17,7	13,8	10,7

При испытаниях на прочность бетона желательно знать средние значения предельных значений как функцию размеров образцов. Средние значения произвольно выбранных образцов имеют тенденцию к нормальному распределению, так что предположение о наличии такого типа распределения, когда применяются средние величины для образцов, не дает большой ошибки и позволяет упростить расчеты. В некоторых практических случаях было получено асимметричное распределение; это может быть результатом не каких-либо «природных» свойств бетона, а следствием плохого качества бетона на строительстве, что не должно доходить до стадии испытания. Полное рассмотрение статистических аспектов при испытании бетона не входит в задачу данной книги.

На рис. 8.14 показано, что и средняя величина прочности, и ее дисперсия уменьшается при увеличении размеров образцов бетона. Экспериментальные данные для предела прочности при изгибе, основанные на испытаниях Райта, приведены на рис. 8.7; на рис. 8.15 показано влияние размеров образцов на разброс результатов. Такая же картина была получена на образцах, испытываемых на чистое растяжение. На рис. 8.16 показано отношение между средней прочностью и размером образца для кубов, а в табл. 8.4 приведены соответствующие величины стан-

дартного отклонения. Призмы и цилиндры дают аналогичную картину (рис. 8.17). Влияние размеров, разумеется, отмечено не только для бетона, но также и для ангидрита и других материалов.

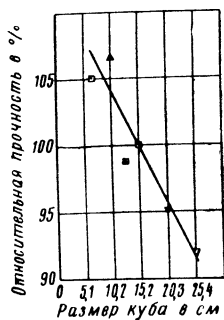


Рис. 8.16. Прочность на сжатие кубов разного размера

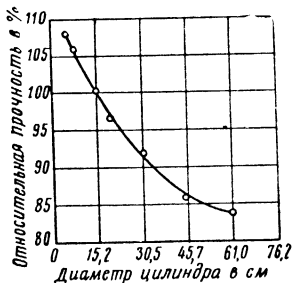


Рис. 8.17. Прочность на сжатие цилиндров разного размера

Эти экспериментальные данные представляют интерес, так как прежде влияние размеров приписывали разным причинам: действию стенок, отношению размеров образца к максимальным размерам заполнителя, внутренним напряжениям, вызванным разницей температуры и влажности на поверхности и в глубине образца, тангенциальным напряжениям при контакте плит испытательной машины с образцом и возникающем при этом трении или изгибе плиты, а также различиями в эффективности методов ухода за бетоном. Последнее предположение, например, было опровергнуто Гоннерманом, результаты опытов которого, представленные на рис. 8.18, показывают, что образцы бетона разного размера и формы приобретают прочность с одинаковой скоростью.

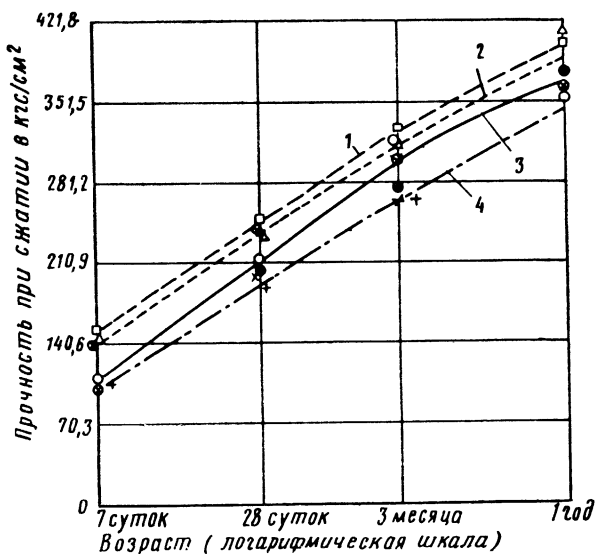


Рис. 8.18. Влияние возраста на прочность при сжатии образцов разного размера и формы (смесь 1:5 по объему)

1 — кубы 15×15×15 см; 2 — цилиндры 15×15 см; 3 — цилиндры 15×31 см; 4 — призмы 15×15×31 см

В пределах обычно применяемых размеров образцов влияние размера на прочность невелико, но заметно, и им не следует пренебрегать в научных исследованиях или при работах, требующих высокой точности.

Применение образцов меньшего размера дает некоторые преимущества. С ними легче манипулировать, они реже подвергаются случайным повреждениям, для испытаний требуется машина меньшей

мощности и уходит меньше бетона, что в лабораторных условиях требует меньших складов и площадей для его твердения, а также меньшего количества заполнителя. С другой стороны, ввиду большего разброса данных, полученных при испытаниях более мелких образцов, их следует испытывать в больших количествах, чтобы получить такую же точность средних значений: вместо трех кубов размером 15,25 см требуется пять-шесть кубов размером 10,15 см или же пять кубов раствора размером 1,25 см вместо двух кубов размером 10,15 см из того же замеса, или четыре куба размером 10,15 см из номинально одинакового замеса.

Интересно представить, можно ли экстраполировать влияние размеров на очень большие конструкции и какова прочность массивных конструкций? Указания об ожидаемой прочности больших образцов, выраженной в единицах прочности образца, принятого за единицу, даны на рис. 8.14. Однако прочность бетона в конструкции, где распределение напряжений неизменно отличается от тех, которые имеются в испытываемом образце, не такая, как прочность, вычисленная при испытании на сжатие. Тем не менее имеется качественная связь между этими двумя прочностями, так что вариации прочности испытываемого образца позволяют судить о вариации качества соответствующего бетона в конструкции. Испытание куба при этом имеет большую ценность, но на основании этого испытания нельзя предсказать, при каком напряжении произойдет разрушение элементов конструкции.

#### **РАЗМЕРЫ ОБРАЗЦА И РАЗМЕРЫ ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

---

Естественно, что размер образца должен быть значительно больше, чем размер самой крупной частицы заполнителя. Имеются различные рекомендации по соотношению минимальных размеров образца и максимальных размеров заполнителя. Например, по BS 1881 : 1952 куб для испытаний должен быть размером не менее 10, 15 см при заполнителе размером 1,9 см, т.е. отношение равно 5,3; при наличии образца в виде куба размером 15,1 см заполнитель может иметь размер 3,8 см. По стандарту ASTM C 192—57, отношение диаметра цилиндра к максимальному размеру заполнителя должно быть не менее 3, а по спецификации Бюро рекламаций США — не менее 4. Обычно удовлетворительным считают отношение от 3 до 4.

Ограничения размеров обусловлены наличием «эффекта стенки»: стенка оказывает влияние на уплотнение бетона, так как количество раствора, необходимого для заполнения пространства между частицами крупного заполнителя и стенкой, гораздо больше, чем для заполнения пустот внутри бетонной массы, поэтому оно превышает соответствующее количество раствора, потребное для хорошо дозированной смеси (рис. 8.19). При испытаниях бетона, содержащего заполнитель размером 1,9 см, для полного уплотнения кубов размером 10,15 см требуется увеличение количества песка, равное 10% общего веса заполнителя, по сравнению со смесью, применяемой для очень больших

конструкций. Для восполнения этого недостатка раствора при изготовлении образца иногда добавляют раствор, оставшийся от замеса.

Эффект стенки выражен тем значительнее, чем больше отношение поверхности образца к его объему, следовательно, он меньше при испытаниях образца на изгиб, чем в кубах или цилиндрах.

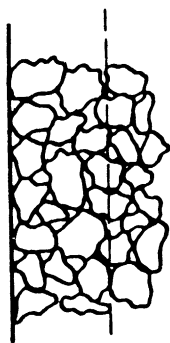


Рис. 8.19. Эффект стенки

Если размер заполнителя превышает допустимые для данного образца пределы, то иногда производят отсев наиболее крупных частиц. Эта процедура называется «мокрым отсеиванием». Отсеивание следует производить быстро, чтобы не допустить высыхания бетона, а просеянный материал необходимо перемешивать вручную. Хотя и можно ожидать, что водоцементное отношение просеянного бетона остается неизменным, но содержание цемента и воды в бетоне возрастает и обычно увеличивается его прочность. Например, отсеивание частиц размером свыше 1,9 см из смеси, имевшей первоначально максимальные частицы размером 3,8 см, увеличивает прочность бетона на сжатие на 7%, а прочность на изгиб — на 15%. По другим данным, отсеивание частиц заполнителя размером от 3,8 до 15,2 см дает увеличение прочности на сжатие на 17—29%.

Эти данные отражают не только влияние изменений состава смеси, но также влияние и самого максимального размера заполнителя на прочность бетона.

### **КЕРНЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ**

Если прочность бетона при испытании на сжатие оказывается ниже установленного предела, то либо бетон в исследуемой конструкции слишком слаб, либо испытываемый куб не отражает точно свойств бетона в конструкции. Последнее предположение часто возникает при обследовании качества конструкции: кубы могут быть повреждены при схватывании, они могут подвергаться действию низких температур до полного затвердевания или неправильно твердеть, иногда же просто возникает сомнение в правильности результатов испытания на разрушение.

Споры обычно разрешаются при испытании образца, сделанного из бетона, взятого из конструкции. Обычно керн вырезают с помощью алмазной буровой коронки. Таким образом получают цилиндрический образец, иногда содержащий кусочки арматуры и имеющий неровные торцовые поверхности. Цилиндр увлажняют, подливают концы и во влажном состоянии испытывают на сжатие.

Влияние отношения высоты образца к диаметру на его прочность было рассмотрено выше. Желательно, чтобы это отношение приближалось к 2; образцы с отношением высоты к диаметру меньше 1 дают ненадежные результаты, а по стандарту BS 1881:1952 минимальная величина этого отношения равна 0,95.

Керны вырезают для определения прочности бетона, они могут также быть использованы для выявления расслоения или образования раковин и проверки прочности рабочих швов.

В некоторых случаях из дорожных или аэродромных покрытий образцы выпиливают в виде балок с помощью алмазной или карборундовой пилы. Такие образцы обычно испытывают на изгиб, но по крайней мере в тех случаях, когда применяется кремнистый заполнитель, вырезанные образцы дают значительно меньшую прочность, чем изготовленные в формах. Выпиливание балок применяется редко.

### **УСКОРЕННОЕ ИСПЫТАНИЕ БЕТОНА**

Бетон обычно укладывается в конструкции слоями, один на другой, поэтому к моменту получения 28-суточных или даже 7-суточных результатов значительное количество бетона пролежит больше, чем тот слой, из которого взяты кубы для испытаний. В таком случае производить ремонт, если бетон окажется слишком слабым, будет уже поздно, а если бетон слишком прочен — это значит, что смесь была неэкономичной.

Ясно, что было бы очень выгодно иметь возможность прогнозировать 28-суточную прочность бетона через несколько часов после его укладки. Прочность бетона через 24 ч с этой точки зрения является надежным показателем не только потому, что различные цементы приобретают прочность с разной скоростью, но также и потому, что даже небольшие отклонения температуры в первые часы после укладки сильно влияют на раннюю прочность бетона. Следовательно, необходимо, чтобы бетон приобрел большую часть своей потенциальной прочности до начала испытаний. Надежный вид испытаний, основанный на ускоренной обработке бетона, был недавно разработан Кингом.

При этом испытании делают стандартные бетонные кубы, после чего формы сразу покрывают крышками, которые смазывают по краям для предупреждения высыхания. Не позже чем через 30 мин после введения воды для затворения, кубы в закрытых формах помещают в герметический нагревательный шкаф, который тотчас после этого включают.

Температура в шкафу должна достичь 93° С (200° F) за 1 ч и оставаться на этом уровне еще 5 ч, так что кубы держат в шкафу всего 6 ч. После этого кубы вынимают из шкафа, расформовывают, охлаждают и испытывают на сжатие обычным способом, на что уходит еще 30 мин.

Таким способом прочность бетона определяется через 7 ч после его укладки, и эта ускоренно определяемая прочность соответствует прочности 7-суточного или 28-суточного бетона, обрабатываемого обычными методами. Кривые Кинга показаны на рис. 8.20. Точность полученных таким путем результатов достаточно высока, но ввиду разной скорости роста прочности для разных цементов невозможно прогнозировать 28-суточную прочность на основании 7-суточной.

Если период в 7 ч неудобен (например, он продолжается уже после окончания рабочего дня), можно применить и другие методы: такое же ускоренное определение прочности можно производить, если продержат кубы в закрытом чану над водой при 15,5°С в течение 18—24 ч и затем прогреть вместо 6 в течение 4 ч (рис. 8.21).

Кривые на рис. 8.20 можно использовать в качестве ориентировочных, но при неизвестном заполнителе или неизвестных условиях более желательно иметь

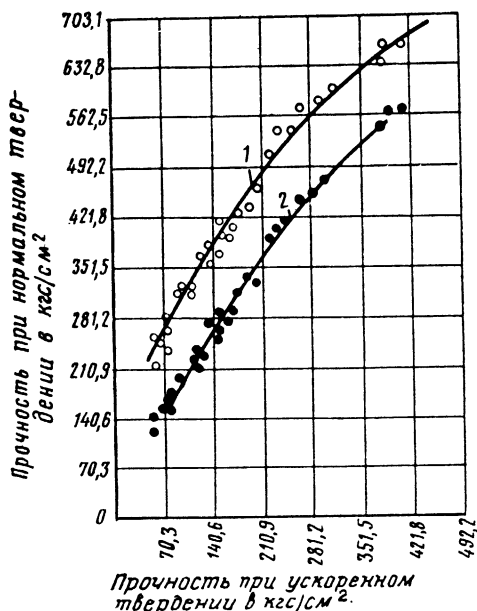


Рис. 8.20. Соотношение между прочностью, определяемой по методу ускоренного твердения Кинга, и 7-суточной и 28-суточной прочностью бетона, твердевшего во влажных условиях при 20°С

1 — 28 сут.; 2 — 7 сут.

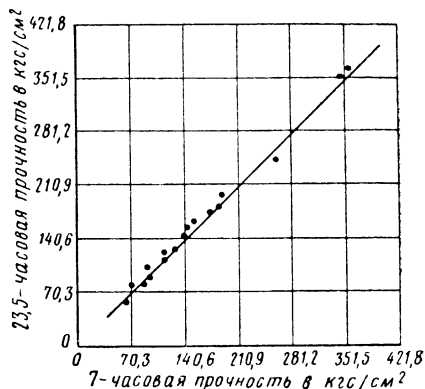


Рис. 8.21. Корреляция ускоренной прочности через 23,5 ч (19,5 ч предварительной выдержки и 3,5 ч в термостате, 0,5 ч предварительной выдержки и 6 ч в термостате)

эмпирические кривые, показывающие связь ускоренной прочности с прочностью нормально обработанного бетона. При этом можно быстро и надежно получить средние величины для контроля прочности.

### ИСПЫТАНИЯ МОЛОТКОМ

Можно избежать трудностей при приготовлении, обработке и испытании стандартных образцов, если иметь возможность испытывать бетон на месте каким-либо безвредным для его качества способом. Были разработаны многочисленные способы, но большинство их оказалось непригодным. Один метод, который нашел практическое применение в определенных условиях, — это метод с применением молотка, разработанный Эрнстом Шмидтом. Этот метод испытаний известен так же, как склерометрическое испытание.

Испытания основаны на принципе, что отдача упругой массы зависит от плотности поверхности, с которой эта масса сталкивается. При испытаниях с молотком (рис. 8.22) снабженная пружиной масса обладает определенным запасом энергии, сообщенным ей при натяжении пружины; это достигается надавливанием плунжера на поверхность исследуемого бетона. При освобождении масса отскакивает от плунжера, все еще придавленное к поверхности бетона, и расстояние, пройденное массой и выражаемое как процент от первоначального натяжения пружины называется числом отдачи; его показывает стрелка, движущаяся по шкале. Число отдачи является произвольным, так как оно зависит от энергии, заключенной в данной пружине, и от величины массы.

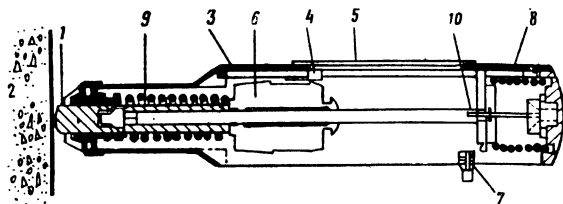


Рис. 8.22. Испытательный молоток

1 — плунжер; 2 — бетон; 3 — кожух; 4 — направляющая, 5 — шкив; 6 — масса; 7 — спусковая кнопка; 8 и 9 — пружины; 10 — фиксатор

Молоток следует применять на гладкой поверхности бетона. Целесообразна обработка ее карборундовым камнем. Если испытываемый бетон не является частью массивной конструкции, он должен находиться на массивной подставке, так как смещение его во время испытаний приведет к уменьшению числа отдачи.

Данный метод является чувствительным к местным изменениям в бетоне; например, наличие крупных частиц заполнителя под самым плунжером даст необычно высокое число отдачи, и наоборот, наличие пустот в этом же месте приведет к очень низким результатам. Поэтому желательно производить 10—12 измерений на испытываемой площади, чтобы получить среднюю величину, отражающую качество бетона. Стандартная ошибка здесь выше, чем при определении прочности испытанием на сжатие, но зато данный метод экономит силы, время и дает значительную экономию в стоимости.

Плунжер должен быть расположен перпендикулярно к поверхности бетона, но число отдачи зависит также и от положения молотка по отношению к вертикали, что является следствием действия силы тяжести на перемещение массы в молотке. В результате этого число отдачи на полу будет меньше, чем на потолке, а на наклонных и вертикальных поверхностях будут получены промежуточные величины; истинные отклонения лучше всего определять экспериментально (рис. 8.23).

Эти испытания определяют твердость бетонной поверхности, и, не смотря на то что не имеется единого соотношения между твердостью и прочностью бетона, может быть получено эмпирическое соотношение для бетонов на одинаковых материалах и твердевших в таких условиях, что свойства бетона в поверхностном слое не отличаются от его свойств в массиве. Изменение в поверхностных слоях, такое, как, на-

пример, водонасыщение поверхностного слоя, может помешать правильно определить свойства внутренних участков бетонной конструкции (рис. 8.23).

На число отдачи влияет и вид примененного заполнителя (рис. 8.24), поэтому соотношение числа отдачи и прочности следует определять экспериментально для каждого состава бетона, применяемого на строительной площадке.

Очевидно, что данный метод испытаний является только сравнительным, поэтому требования замены им испытаний прочности при сжатии не оправданы. В частности, твердость бетона зависит от упру-

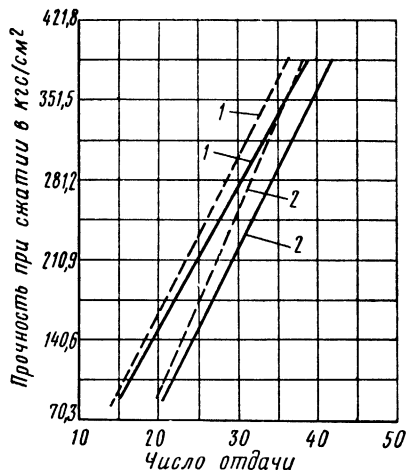


Рис. 8.23. Соотношение между прочностью на сжатие цилиндров и числом отдачи при горизонтальном и вертикальном положении молотка на сухой и влажной поверхности бетона

— молоток горизонтальный; — — — молоток вертикальный; 1 — влажный бетон; 2 — сухой бетон

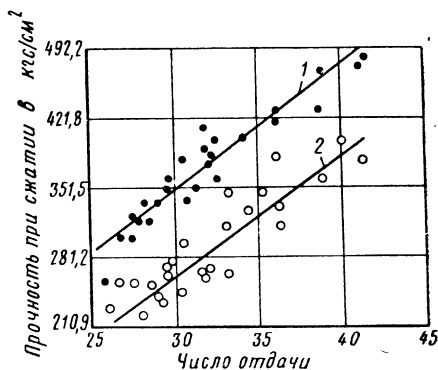


Рис. 8.24. Соотношение прочности на сжатие и числа отдачи для бетонных цилиндров с разными заполнителями (значения получены при горизонтальном положении молотка)

1 — дробленый известняк; 2 — гравий

гости заполнителя, а также от больших различий в составе смесей. Тем не менее этот метод весьма полезен для измерения однородности бетона и очень ценен для проверки качества материалов в разных участках конструкции, а также в производстве массовой однородной продукции, такой, как сборный бетон. Истинная прочность бетона, с которой сравниваются эти результаты, должна определяться с помощью обычных испытаний на разрушение.

Бетонная конструкция может также испытываться с помощью молотка, чтобы видеть, когда будет получено число отдачи, которое соответствует необходимой прочности. Это помогает определить момент, когда надо снимать опалубку или давать нагрузку на конструкции. Другая цель применения молотка — это проверка влияния низких температур на прочность бетона в раннем возрасте.



Стандартные испытания прочности бетона проводятся на специально приготовленных образцах. В результате степень уплотнения бетона в конструкции не отражается результатами испытаний прочности образцов, поэтому невозможно определить, действительно ли конструкцией приобретена определенная прочность. Можно, разумеется, вырезать образец из самой конструкции, но это неизбежно поведет к повреждению ее элемента. Кроме того, такая процедура слишком дорога для широкого применения.

В связи с этим предпринимались попытки определять некоторые физические свойства бетона, связанные с его прочностью, без разрушения бетона. Значительный успех был получен при определении скорости распространения продольной волны в бетоне. Между этой скоростью и прочностью бетона не существует однозначной зависимости, однако при определенных условиях эти два показателя корреляционно связаны. Связующим фактором является плотность бетона: при изменении плотности меняется и скорость импульса. Точно так же для данной смеси отношение истинной плотности к потенциальной (при полном уплотнении) плотности и получаемая прочность тесно связаны. Таким образом, уменьшение плотности, вызванное увеличением водоцементного отношения, снижает как прочность бетона при сжатии, так и скорость прохождения через него импульсов.

Аппарат для сверхточных измерений скорости ультразвука в бетоне уже применяется, но метод отработан еще недостаточно и поэтому не включен в стандарты.

Скорость волны определяют не прямым путем, а вычисляют из времени, затраченного на прохождение импульсом определенного расстояния. Ультразвуковой импульс — отсюда и название испытаний — получается путем быстрой передачи потенциалов с передающего устройства на пьезоэлектрический кристалл приемного устройства, являющийся источником колебаний на основной частоте. Для этой цели самым пригодным оказался титанат бария. Кристалл соприкасается с бетоном таким образом, что колебания проходят через бетон и улавливаются другим кристаллом, соприкасающимся с противоположной поверхностью испытываемого образца. Второй кристалл генерирует электрические сигналы, которые проходят через усилитель к электродам катодной лампы. Вторая пластинка подает сигналы отметок времени через определенные интервалы. Таким образом, по измерению смещения импульса по сравнению с его положением, когда кристаллы соприкасались один с другим, время, затрачиваемое импульсом на прохождение внутри бетона, определяется с точностью до  $\pm 0,1$  мксек. При времени передачи импульса, равном для бетона толщиной 15,25 см 30—45 сек, скорость определяется с точностью менее 0,5%. При увеличении длины проходимого импульсом пути скорость распространения волны снижается, но точность измерений не увеличивается. Обычно испытания могут проводиться на бетоне толщиной от 10 см до 2,5 м, хотя проводились такие испытания и на бетоне толщиной до 15 м.

При выборе частоты ультразвуковых колебаний следует помнить, что чем выше частота, тем меньше рассеивание направлений, по которым идет волна, а поэтому тем выше получаемая энергия. С другой стороны, чем выше частота, тем больше затухание энергии. Обычно применяют кристаллы с частотой от 50 до 200 *кГц/сек*.

Если невозможно соприкосновение кристаллов с двумя противоположными сторонами бетона, то скорость импульса можно измерять вдоль пути, параллельно поверхности бетона. В этом случае кристаллы помещаются на одной и той же поверхности конструкции, на известном расстоянии. Однако при этом получается значительно более низкая энергия и точность показаний соответственно снижается.

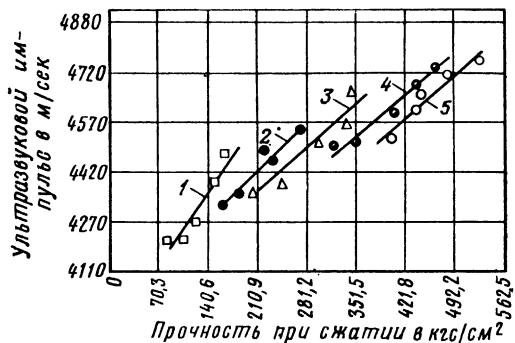


Рис. 8.25. Соотношение скорости ультразвукового импульса и прочности на сжатие для бетонов различного состава

1 — 1:3:6; 2 — 1:2,5:5; 3 — 1:2:4; 4 — 1:1,5:3; 5 — 1:1:2

Измерение скорости ультразвуковых волн применяется в качестве метода контроля качества продукции, которая должна быть изготовлена из бетона одного состава. При этом легко обнаруживаются недостаточное уплотнение и изменение водоцементного отношения. Этот метод не может применяться для определения прочности бетонов, сделанных из разных материалов в неизвестных пропорциях. Бетон с большей плотностью имеет и большую прочность (при условии, что удельный вес заполнителя является постоянным), так что возможно классифицировать качество бетона на основании данных о скорости распространения импульса. Некоторые данные, предложенные Уайтхэрстом для бетона с плотностью около 2400 *кг/м³*, приведены в табл. 8.5. По данным Джонса, нижний предел скорости распространения импульса для бетона хорошего качества лежит между 4100 и 4700 *м/сек*.

Это несоответствие и обычно широкие вариации скорости импульса в бетонах определенного качества являются следствием влияния крупного заполнителя. Как его количество, так и его вид влияют на скорость распространения колебаний, а для постоянного водоцементного отношения влияние крупного заполнителя на прочность бетона сравнительно мало. Таким образом, для разных составов смеси будут получены различные отношения между прочностью и скоростью импульса; это пока-

зано на рис. 8.25, основанном на данных Джонса. Для практических целей удобно устанавливать соотношение между прочностью и скоростью ультразвуковой волны с помощью испытания образцов-кубов. Кубы должны иметь такую же влажность, как и бетон в конструкции, так как влажность бетона очень сильно влияет на скорость распространения колебаний. Если калибровка произведена на влажных кубах, а бетон в конструкции уже сухой, то прочность последнего будет недооценена на 10—15%, возможно и более.

Кроме контроля качества бетона, ультразвуковой метод можно применять для выявления трещин в массивных конструкциях типа плотин или разрушений от действия мороза и химических факторов. Это очень важные аспекты использования данного метода, который пригоден для выявления любых пустот в бетоне.

Ультразвуковой аппарат можно также применять для определения толщины бетонных покрытий дорог или тротуаров при условии, что нижние поверхности плит достаточно ровные. Измеряется время, затрачиваемое импульсом на прохождение до нижней поверхности и на возвращение отраженного импульса, а зная скорость импульса, можно вычислить толщину бетона. Это может оказаться полезным при определении несущей способности бетонных плит неизвестной толщины, а также для контроля конструкций.

### **ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ**

В ряде случаев возникает необходимость определить изменения прочности в бетоне, ее увеличение или, наоборот, снижение вследствие разрушающего действия низкой температуры или химических воздействий. Такое исследование можно проводить путем испытаний на сжатие большого количества образцов, приготовленных из одного замеса и испытываемых через заданные интервалы времени. Однако желательнее было бы изучать свойства одного и того же образца бетона через определенные интервалы в течение всего времени исследования.

Для этого можно воспользоваться соотношением между прочностью бетона и его динамическим модулем упругости, так как последний может определяться без повреждения образца. Отношение между этими величинами зависит от применяемого заполнителя, состава смеси, условий твердения, но для данного образца колебания величины модуля упругости могут служить хорошим показателем колебаний прочности бетона.

Модуль упругости определяется на лабораторных образцах, подвергаемых продольному вибрированию с собственной частотой колебаний, он известен как динамический модуль упругости. BS 1881 : 1952 рекомендует применять образцы, аналогичные тем, какие применяются для определения предела прочности при изгибе, т. е. брусы размерами 15,25×15,25×71,15 см или 10,15×10,15×50,8 см. Образец закрепляется в центре (рис. 8.26), с одного торца его помещается электромагнитный вибратор, с другого — датчик. Вибратор приводится в движение осцил-

лятором с переменной частотой в пределах 100—10 000 циклов/сек. Вибрации, передающиеся по бетону, улавливаются датчиком, усиливаются и с помощью специального индикатора измеряется их амплитуда (рис. 8.27). Частота вибрирования изменяется до получения резонанса при основной (т. е. самой низкой) частоте колебаний образца бетона;

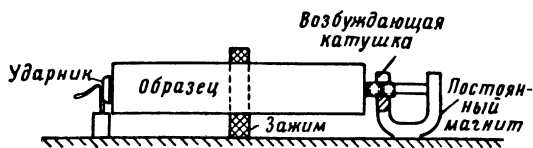


Рис. 8.26. Проведение испытаний по BS 1881 : 1952 для определения динамического модуля упругости (продольные колебания)

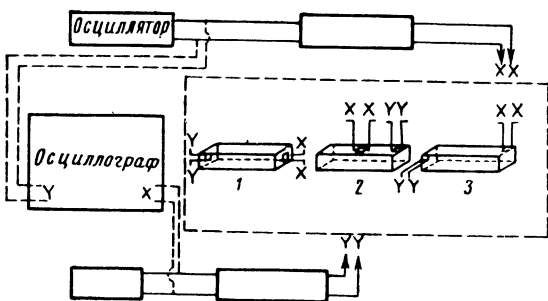


Рис. 8.27. Схема аппарата для определения динамического модуля упругости

1 — продольные колебания; 2 — поперечные колебания; 3 — крутильные колебания (метод ASTM C 215—60)

стандартом ASTM C 215—60. Определение динамического модуля упругости весьма ценно при лабораторных исследованиях, но при общих сравнениях свойств бетона не следует забывать об ограниченной применимости соотношения прочность : модуль упругости.

### ИСТИРАЕМОСТЬ БЕТОНА

Сопротивление бетона истиранию можно определять различными методами, каждый из которых основан на воспроизведении истирания бетона в практических условиях. При всех испытаниях показателем истирания является уменьшение веса образца.

При испытаниях на истирание стальным шаром нагрузка прилагается к вращающейся головке, которая отделена от образца стальными шарами.

Испытание с помощью шлифовального круга производят с примене-

это отмечается максимальным отклонением индикатора. Если эта частота равна  $n$  циклов/сек,  $L$  — длина образца, а  $\rho$  — его плотность, то динамический модуль упругости вычисляется по формуле

$$E = Kn^2L^2\rho,$$

где  $K$  — константа.

Длину бруса и его плотность следует определять очень точно. Если  $L$  измерять в см, а  $\rho$  — в кг/см<sup>3</sup>, то

$$E = 6 \cdot 10^{-6} n^2 L^2 \rho.$$

В дополнение к испытаниям, основанным на частоте продольного резонанса, определяется также поперечная частота (см. рис. 8.27, случай 2) и торсионная (случай 3) частота. Оба эти метода, как и продольные испытания, описаны

нием бурового пресса, через который нагрузку передают на 32 вращающихся шлифовальных круга, соприкасающихся с образцом. Головка за время испытаний делает 5000 оборотов со скоростью 190 об/мин, абразивным материалом служит карбид кремния.

Испытания с помощью шлифовальных кругов и стальных шаров позволяют определять сопротивление бетона истиранию колесами машин или обувью пешеходов. Склонность к эрозии твердыми частицами в проточной воде измеряют с помощью обработки поверхности бетона зарядом дробы. При этом 2000 кусочков стальных дробинок выбрасывают под давлением воздуха, равным  $6,3 \text{ кгс/см}^2$ , из наконечника диаметром 0,6 см на расстоянии 10 см от образца.

Имитировать практические условия истирания бетона нелегко, и главная трудность испытаний на истираемость состоит в том, чтобы с уверенностью можно было считать результаты испытания соответствующими истинному сопротивлению бетона.

На рис. 8.28 показаны результаты трех испытаний на различных бетонах. Ввиду произвольных условий испытаний полученные значения нельзя сравнивать количественно, однако во всех случаях сопротивление истиранию оказалось пропорциональным прочности при сжатии бетона. Испытание со стальными шарами дает лучшее совпадение результатов, чем остальные два метода. BS 1881:1956 рекомендует испытывать бетонные плиты с помощью свободно падающих стальных шаров во вращающемся контейнере.

Влияние физических свойств заполнителя зависит от вида испытаний: при применении стальных шаров или шлифовальных кругов наличие более мягкого заполнителя приводит к большему истиранию, при обработке поверхности дробью более твердый заполнитель раскалывается и вызывает большую потерю бетона. Определенное значение имеет также гранулометрический состав заполнителя, так как при большем содержании песка в смеси происходит и большее истирание. Но все же прочность бетона при сжатии является самым важным фактором для его сопротивляемости истиранию; эта сопротивляемость может быть увеличена применением достаточно тощих смесей. Бетон с небольшим водоотделением имеет более прочный поверхностный слой и поэтому меньшую истираемость. Для повышения сопротивления истиранию важно влажное твердение; некоторые способы ухода при помощи пленок вредны, в то время как абсорбирующая опалубка улучшает сопротивление поверхности истиранию.

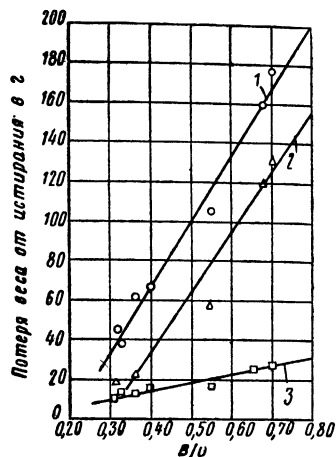


Рис. 8.28. Влияние водоцементного отношения смеси на потерю при истирании бетона при различных испытаниях

испытание: 1 — стальными шарами; 2 — на шлифовальном круге; 3 — дробью

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ЗАТВЕРДЕВШЕГО БЕТОНА**

Иногда при обсуждении качества затвердевшего бетона встает вопрос, отвечает ли его состав требованиям технических условий. Для ответа на этот вопрос производятся химические и физические испытания бетонных образцов.

### **СОДЕРЖАНИЕ ЦЕМЕНТА <sup>1</sup>**

Метод определения содержания цемента описан в стандарте ASTM C 85—1954. Он основан на том, что силикаты в портландцементе быстрее разрушаются и становятся растворимыми в разбавленной соляной кислоте, чем обычно содержащийся в заполнителе кремнезем. Это же относится и к относительной растворимости соединений кальция в цементе и заполнителе (разумеется, за исключением известнякового заполнителя), поэтому применяют также метод определения растворимой окиси кальция.

Метод заключается в измельчении исследуемого образца бетона, имеющего известные вес и объем до частиц величиной около 1,25 см, которые затем раздробляются до размеров, которые могут пройти через сита с диаметром отверстия 0,1—0,08 мм. Берут около 100 г этого материала и высушивают при 105° С. Небольшие порции бетона обрабатывают 3,3 н. раствором соляной кислоты; при этом выделяется кремнезем, содержащийся в цементе. Количество кремнезема определяют с помощью стандартных химических методов.

Оставшийся фильтрат содержит растворимую окись кальция из заполнителя и цемента, и дальнейшие вычисления зависят от того, является ли заполнитель силикатным или нет. Если имеется исходный заполнитель, то необходимо проверить его растворимость.

По данным о содержании растворимых кремнезема и окиси кальция можно определить содержание цемента в исходном объеме бетонного образца, применив данные стандарта ASTM C 85—1954. Полученные результаты являются надежными и могут применяться для проверки содержания цемента в различных участках конструкций, например, когда необходимо установить, произошло ли отделение цемента. Однако для смесей с низким содержанием цемента точность этого метода невелика, а именно: при таких составах нужно точно знать величину содержания цемента. Кроме того, результаты этих испытаний зависят от химического состава заполнителя, которое при испытаниях может быть неизвестно. Химические испытания довольно дороги и применяются только для решения спорных вопросов, а не для контроля качества бетона.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНОГО ВОДОЦЕМЕНТНОГО ОТНОШЕНИЯ**

Метод определения водоцементного отношения в момент укладки бетонной смеси был разработан Брауном. Метод состоит в определении объема капиллярных пустот, веса цемента и связанной воды.

<sup>1</sup> Методика определения содержания цемента приведена в [58]. (Прим. ред.)

Образец бетона высушивают при  $105^{\circ}\text{C}$  и под вакуумом удаляют воздух из пустот. Затем пустоты заполняют четыреххлористым углеродом, вес которого определяют, на основании чего вычисляют вес воды, первоначально заполнявшей пустоты. Поскольку те пустоты, которые образовались при вовлечении воздуха, не сообщаются между собой, они так и остаются заполненными воздухом под вакуумом и вода в них не проникает. Следовательно, вовлеченный воздух не влияет на результаты этих испытаний.

Затем образец разрушают, четыреххлористый углерод испаряется, а заполнитель отделяют и взвешивают. Определяют потерю при прокаливании и содержание  $\text{CO}_2$  в оставшемся мелком материале и по этим двум цифрам вычисляют вес связанной воды.

Сумма весов связанной воды и воды, заполнявшей пустоты, дает первоначальный вес воды в смеси. Можно также определить количество безводного цемента либо в связи с проведенным испытанием, либо с помощью описанного выше метода; на основании этого водоцементное отношение смеси можно вычислять с точностью до 0,02 от исходной величины.

### **ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ**

Поливка с успехом применял метод подсчета точек для определения содержания цемента, заполнителя и отношения мелкого и крупного заполнителя в бетоне. Метод основан на том, что относительные объемы составных частей гетерогенной твердой массы прямо пропорциональны их относительным площадям в поперечном сечении образца, а также проекциям этих площадей на произвольно выбранную линию. Кроме того, частота этих составных частей в данном количестве равномерно расположенных вдоль произвольно выбранной линии точек является непосредственной мерой относительного объема этих частей в твердой массе. Таким образом, пользуясь указанным методом, с помощью стереомикроскопа можно быстро определить состав образца затвердевшего бетона.

Можно определить количество заполнителя и пор, содержащих воздух или испаряющуюся воду, а остальное считать гидратированным цементом. Для перевода последнего в объем негидратированного цемента необходимо знать удельный вес сухого цемента и содержание испаряющейся воды в гидратированном цементе; эти данные были определены Пауэрсом.

Такой метод испытаний позволяет определять содержание цемента в бетоне с точностью до 10%, но не дает возможности установить исходное количество воды или пористость, так как здесь не учитываются различия между воздушными порами и порами, заполненными водой.

### **КОЛЕБАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ**

О вариации прочности в образцах бетона одинакового состава уже упоминалось, но это следует рассмотреть в статистическом аспекте. Применим некоторые простейшие статистические понятия.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ

Предположим, что измерена прочность при сжатии 100 кубов, сделанных из одинакового бетона. Этот бетон можно представить в виде совокупности единиц, каждая из которых может быть подвергнута испытаниям; такая совокупность называется популяцией, а часть бетона в фактических кубах называется пробой. Целью испытаний проб является получение информации о свойствах начальной популяции.

Исходя из природы прочности бетона можно было бы ожидать, что определяемые прочности будут разными в разных кубах, т.е. получаемые результаты будут иметь определенный разброс. Предположим, что прочности меняются в пределах 322—476 кгс/см<sup>2</sup>. Хорошее представление о распределении этих прочностей может быть получено при группировании их с интервалом 14 кгс/см<sup>2</sup>; при этом мы получим, что в каждый интервал попадают несколько кубов, например:

Интервал прочности в кгс/см <sup>2</sup>	Число кубов в каждой группе
322—336	1
336—350	2
350—364	6
364—378	13
378—392	21
392—406	23
406—420	18
420—434	8
434—448	5
448—462	1
462—476	2
Всего 100	

Если построить график и по оси абсцисс отложить интервалы прочности, а по оси ординат — количество кубов в каждом интервале (т.е. частоту), то получим гистограмму. Площадь под кривой представляет собой общее число кубов в определенной шкале. Иногда удобнее выражать частоту в виде процента от общего числа образцов, т.е. применять понятие относительной частоты.

Гистограмма для указанных выше данных представлена на рис. 8.29; она дает ясную картину разброса результатов или, что более точно, распределение прочности в исследуемых пробах.

Другим простым методом вычисления дисперсии является определение пределов получаемых значений, т.е. разницы между наибольшим и наименьшим значением прочности; в нашем случае 154 кгс/см<sup>2</sup>. Эта величина определяется очень быстро, но она является лишь грубым приближением, так как основана только на двух величинах. Кроме того, при наличии большого числа образцов эти значения встречаются



очень редко и могут дать неправильную картину распределения. Теоретическая связь между предельными значениями стандартных отклонений показана на рис. 8.30, где также приведены и полученные на практике данные.

Если число образцов стремится к бесконечности, а размер интервала в то же время стремится к нулю, то гистограмма принимает вид непрерывной кривой, называемой кривой распределения. Для прочностей определенного материала эта кривая примет характерный вид; фактически имеются несколько «типов» кривых, свойства которых были подробно рассчитаны и приведены в стандартных статистических таблицах.

Один такой вид распределения — это так называемое нормальное распределение или распределение Гаусса. О применении этого типа распределения к прочности бетона уже упоминалось в этой главе; нормальное распределение прочностей весьма близко к истине и является полезным при вычислениях.

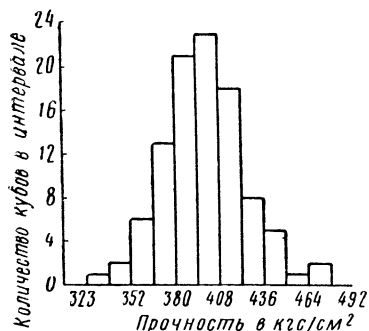


Рис. 8.29. Гистограмма значений прочности, приведенных выше

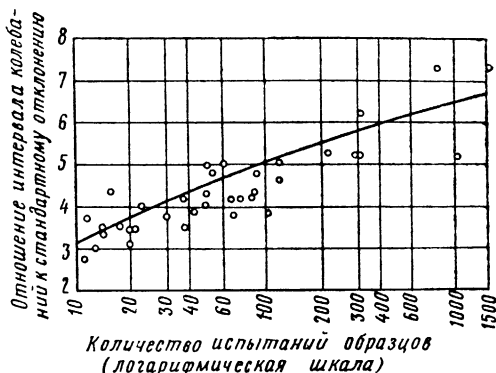


Рис. 8.30. Отношение интервала колебаний к стандартному отклонению для образцов разного размера. Кривая — теоретическая на основе нормального распределения

Уравнение кривой нормального распределения, зависящее только от величины среднего  $\mu$  и стандартного отклонения  $\sigma$ , имеет следующий вид:

$$Y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Это уравнение графически представлено на рис. 8.31, из которого видно, что кривая симметрична относительно среднего значения и бесконечна к плюсу и минусу. Этот факт иногда упоминают при критике применения нормального распределения прочностей, но вероятность получения очень высоких или очень низких значений прочности чрезвычайно мала и не имеет практического значения.

Площадь под кривой между определенными значениями прочности (измеряемыми стандартным отклонением) представляет собой, так же как и на гистограмме, количество образцов, лежащих в определенных пределах прочности. Но поскольку кривая относится к бесконечной совокупности образцов, а мы имеем дело с конечным их числом, то площадь под кривой между данными ординатами, выраженная как часть общей площади под всей кривой (называемая пропорциональной площадью), показывает вероятность попадания произвольно выбранного образца  $X$  в указанные пределы. При умножении значения этой вероятности на 100 имеем процент ожидания для данного образца попасть в указанные пределы прочности. Статистические таблицы дают значения пропорциональных площадей для различных значений  $\frac{X-\mu}{\sigma}$ .

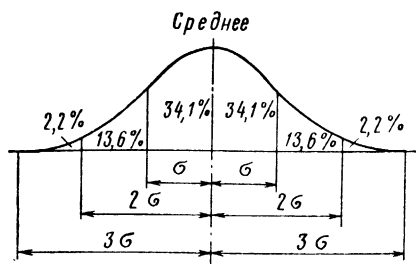


Рис. 8.31. Кривая нормального распределения: показан процент образцов в интервалах одного стандартного отклонения

предделах прочности. Но поскольку кривая относится к бесконечной совокупности образцов, а мы имеем дело с конечным их числом, то площадь под кривой между данными ординатами, выраженная как часть общей площади под всей кривой (называемая пропорциональной площадью), показывает вероятность попадания произвольно выбранного образца  $X$  в указанные пределы. При умножении значения этой вероятности на 100 имеем процент ожидания для данного образца попасть в указанные пределы прочности. Статистические таблицы дают значения пропорциональных площадей для различных значений  $\frac{X-\mu}{\sigma}$ .

значения пропорциональных площадей для различных значений  $\frac{X-\mu}{\sigma}$ .

### СТАНДАРТНОЕ ОТКЛОНЕНИЕ

Из приведенного выше обсуждения видно, что дисперсия прочностей или отклонение от среднего значения есть фиксированная функция стандартного отклонения. Она называется средним квадратичным отклонением, т. е.

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sum (X - \mu)^2}{n}\right)},$$

где  $X$  — величины прочности  $n$  образцов,  $\mu$  — среднее арифметическое этих прочностей, т. е.  $\mu = \frac{\sum X}{n}$ .

На практике мы имеем дело с ограниченным числом образцов, и их среднее  $\bar{X}$  представляет собой оценку истинного (относящегося ко всей совокупности) среднего значения  $\mu^*$ .

Мы определяем отклонение от  $\bar{X}$ , а не от  $\mu$ , и поэтому в знаменатель выражения, определяющего величину  $\sigma$ , ставим не  $n$ , а  $(n-1)$ . Причиной введения этой поправки,  $\frac{n}{n-1}$ , называемой поправкой Бесселя, является то, что сумма квадратов отклонений имеет минимальное

\* Точность оценки истинного среднего  $\mu$  с помощью  $\bar{X}$   $\mu$  зависит от стандартного отклонения среднего, называемого стандартной ошибкой  $\sigma_n$ , где  $\sigma_n = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ . Таким образом,  $X$  с вероятностью 0,68 лежит в пределах  $\mu \pm \sigma_n$ .

значение, если она взята вблизи среднего  $\bar{X}$ , следовательно, она меньше, чем была бы при рассмотрении среднего всей  $\mu$ .

Отсюда  $\sigma$  определяется как

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}}.$$

Разумеется, при больших  $n$  поправка Бесселя не имеет практического значения.

Важным является то, что одно полученное в эксперименте значение (например, результаты испытаний одного куба) не дает величины стандартного отклонения и не показывает достоверности результатов или вероятной ошибки полученных данных.

Формула для вычисления  $\sigma$ , приведенная выше, довольно сложна, и ее удобно заменить другим выражением:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum X^2}{n} - \bar{X}^2} = \frac{1}{n} \sqrt{n \sum X^2 - (\sum X)^2}.$$

Таким образом, сумма  $X^2$  получается без определения разностей  $(X - \bar{X})$ , она определяется быстро с помощью таблиц или счетных машин. Вычисления могут быть упрощены и другими методами, например вычитанием определенного количества из всех значений. Для получения  $S$  (стандартного отклонения) применяют поправку Бесселя:

$$S = \sigma \sqrt{\frac{n}{n - 1}}.$$

Стандартное отклонение вычисляется в тех же единицах, как и исходные величины  $X$ , но в некоторых случаях удобно вычислять разброс результатов в процентах. В этом случае берут отношение  $\frac{\sigma}{\bar{X}} 100$ , которое называется коэффициентом вариации и является безразмерной величиной.

Графически стандартное отклонение (см. рис. 8.32) выражается расстоянием по горизонтали от средней до точки перегиба кривой нормального распределения. Поскольку кривая симметрична, площадь под кривой между абсциссами  $\mu - \sigma$  и  $\mu + \sigma$  составляет 68% всей площади под кривой. Другими словами, вероятность того, что прочность произвольно взятого куба лежит в пределах  $\mu \pm \sigma$ , равна 0,68. Вероятности других отклонений от среднего даны на рис. 8.31.

Для данной средней величины прочности стандартное отклонение полностью характеризует распределение, которое принято за нормальное; вариации величины стандартного отклонения определяют распределение прочностей в  $кгс/см^2$ . На рис. 8.33 показаны кривые распределения для величин стандартного отклонения, равных 24,5 39,2 и 63  $кгс/см^2$ . Величина стандартного отклонения влияет на (среднюю) прочность, которая должна быть получена при проектировании состава смеси для бетона данной минимальной прочности.

**ЛЕГКИЕ И ОСОБОТЯЖЕЛЫЕ  
БЕТОНЫ**

Эта глава посвящена изоляционным бетонам и конструктивным бетонам, плотность (объемная масса) которых значительно ниже или выше обычных пределов 2240—2560 кг/м<sup>3</sup>.

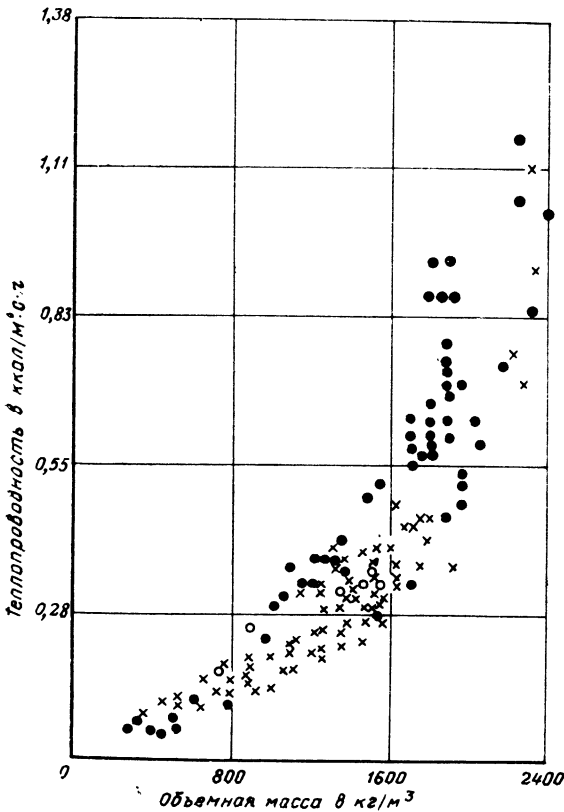


Рис. 9.1. Теплопроводность бетонов на легких заполнителях различных видов

Особотяжелый бетон применяется главным образом в конструкциях биологической защиты, а при применении легких бетонов руководствуются преимущественно экономическими соображениями.

В бетонных конструкциях собственный вес составляет значительную часть общей нагрузки, поэтому понятны существенные преимущества уменьшения объемной массы бетона. Основными из них являются применение меньших сечений и соответствующее сокращение размеров конструкций. Кроме того, опалубка при легком бетоне должна выдерживать меньшее давление, чем при обычном бетоне, а также уменьшается общий вес материалов, которые необходимо перерабатывать, что позволяет соответственно увели-

чить производительность. Легкий бетон обеспечивает лучшую теплоизоляцию, чем обычный бетон (рис. 9.1). Объемная масса легкого бетона находится в пределах 320—1920 кг/м<sup>3</sup>.

### КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ

Существуют три основных метода изготовления легкого бетона. В первом обычный заполнитель с удельным весом около 2,6 заменяют пористым легким заполнителем с малым удельным весом. Полученный таким образом бетон обычно называют по виду применяемого легкого заполнителя.

Второй метод получения легкого бетона заключается в создании больших пор в бетоне или растворе. Эти поры следует отличать от мелких пор, образованных в результате воздухововлечения. Такой вид бетона известен как газобетон, ячеистый бетон или пенобетон<sup>1</sup>.

По третьему методу мелкий заполнитель исключают из смеси, что способствует образованию большого количества промежуточных пор. При этом применяют обычный крупный заполнитель. Этот бетон обычно называют беспесчаным (крупнопористым). Таким образом, уменьшение объемной массы происходит во всех случаях вследствие наличия пор в заполнителе, цементном растворе или в промежутках между частицами заполнителя. Очевидно, что наличие этих пор снижает прочность легкого бетона по сравнению с обычным, но в ряде случаев высокая прочность не нужна. Легкий бетон является хорошим теплоизоляционным материалом, обладает достаточной долговечностью, но не стоек к истиранию. В целом легкий бетон стоит дороже, чем обычный. Приготовление бетонной смеси, ее транспортировка и укладка требуют значительно больше заботы и внимания, чем обычная бетонная смесь. Однако во многих случаях преимущества легкого бетона превосходят его недостатки и во всем мире сейчас заметна тенденция к более широкому применению легких бетонов, а также к применению их в новых областях.

Легкие бетоны можно классифицировать по их назначению: на конструктивные легкие бетоны и бетоны, применяемые в качестве теплоизоляции в ненесущих стенах — теплоизоляционные легкие бетоны. Раньше применяли конструктивные легкие бетоны плотной структуры на пористом заполнителе, но теперь это не всегда так, поэтому лучше строить классификацию конструктивных легких бетонов исходя из минимальной прочности при сжатии. В США, например, принято, что конструктивные легкие бетоны должны иметь прочность при сжатии, измеренную на стандартных цилиндрах в возрасте 28 суток не менее 140,6 кгс/см<sup>2</sup>. Объемный вес такого бетона в сухом состоянии обычно составляет более 960 кг/м<sup>3</sup>. Недостатком всех легких бетонов является необходимость устройства гидроизоляции путем их штукатурки при применении в наружных конструкциях.

---

<sup>1</sup> По классификации, принятой в СССР, газобетон и пенобетон являются разновидностями ячеистого бетона. (Прим. ред.)

Основной особенностью легких заполнителей является их высокая пористость и как следствие низкий удельный вес. Применяются как природные, так и искусственные легкие заполнители.

**ПРИРОДНЫЕ ЗАПОЛНИТЕЛИ**

Основными заполнителями, относящимися к этой группе, являются: диатомит, пемза, вулканический шлак, вулканический пепел и туф. Кроме диатомита все эти породы вулканического происхождения. Природные легкие заполнители находят ограниченное применение, так как добываются только в некоторых районах земного шара. Пемза — это светло-окрашенное пенообразное вулканическое стекло с объемной массой 480—880 кг/м<sup>3</sup>. Разновидности пемзы, имеющие достаточно прочную структуру, позволяют получать бетон с объемной массой 720—1440 кг/м<sup>3</sup>, с хорошими изоляционными свойствами, но с большим водопоглощением и усадкой.

Вулканический шлак, являющийся пористой стекловидной породой, аналогичной промышленным шлакам, позволяет получать бетон со сходными свойствами.

**ИСКУССТВЕННЫЕ ЗАПОЛНИТЕЛИ**

Искусственные заполнители часто известны под различными фирменными названиями, но лучше классифицировать их по методам изготовления.

В первую группу входят заполнители, получаемые в результате вспучивания при нагревании глины, глинистых и кремнистых сланцев, диатомовых сланцев, перлита, обсидиана и вермикулита.

Вторая группа характеризуется специальными процессами охлаждения, в результате которых достигается вспучивание доменных шлаков. К третьей группе относятся промышленные шлаки.

Вспученная глина и сланцы получают при нагревании сырья во вращающейся печи до плавления (при температуре 1000—1200° С). Вспучивание материалов происходит вследствие заземления в них образующихся газов. Полученная пористая структура сохраняется при охлаждении таким образом, что удельный вес вспученного материала оказывается ниже, чем до нагревания. Часто сырье измельчается перед обжигом. Применяют также измельчение после вспучивания, например при изготовлении патентованного американского заполнителя из вспученного сланца, известного под названием хейдит (керамзит). Для предотвращения спекания частиц применяют покрытие их материалом, имеющим более высокую температуру плавления, чем сланцы. В результате получают сферические частицы вспученного сланца с глазурированной полунепроницаемой поверхностью. Водопоглощение их ниже, чем у частиц без покрытия, водопоглощение которых составляет от 12 до 34%. Частицы с покрытием легче транспортировать и перемешивать, получа-

емый бетон имеет лучшую удобообрабатываемость, но он значительно дороже.

Бетон на вспученном сланце и глине имеет объемную массу от 1360 до 1760 кг/м<sup>3</sup>, но можно приготовить бетон и с объемной массой 800 кг/м<sup>3</sup>.

Бетоны на вспученном сланце и глине обычно имеют более высокую прочность, чем на других легких заполнителях<sup>1</sup>.

Перлит — это стекловидная вулканическая порода. При быстром нагревании до температуры начала плавления (900—1100° С) он вспучивается вследствие образования пара и образует ячеистый материал с объемной массой 80—240 кг/м<sup>3</sup>. Бетон на перлитовом заполнителе имеет очень низкую прочность, большую усадку и применяется преимущественно для теплоизоляции.

Вермикулит — это материал с пластинчатой структурой, напоминающий слюду. При нагревании до температуры 650—1000° С вермикулит увеличивается в объеме более чем в 30 раз вследствие расслоения его тонких пластинок. В результате его объемная масса составляет всего 64—192 кг/м<sup>3</sup>. Бетон на вермикулитовом заполнителе имеет очень низкую прочность и большую усадку, но является прекрасным теплоизоляционным материалом.

Вспученный доменный шлак (шлаковая пемза) получают при обрызгивании расплавленного шлака, выходящего из доменной печи (при производстве чугуна) определенным количеством воды. При этом образуется пар, вспучивающий шлак, находящийся в пластичном состоянии, так что он затвердевает, образуя пористые частицы, напоминающие пемзу. Вспученный шлак (шлаковая пемза) применяется уже много лет и выпускается с насыпной объемной массой 320—880 кг/м<sup>3</sup> в зависимости от деталей процесса охлаждения и гранулометрического состава. Шлаковая пемза для заполнителей должна соответствовать стандарту BS 877:1939, а воздушно охлажденный шлак — стандарту BS 1047:1952. Бетон на шлаковой пемзе имеет объемную массу 960—1760 кг/м<sup>3</sup>.

Заполнитель из котельного шлака получают на основе хорошо обожженных, расплавленных или спекшихся в комки отходов промышленных высокотемпературных печей. Важно, чтобы в шлаке не было негоревшего угля, могущего вызвать нежелательное расширение бетона. Стандарт BS 1165:1957 предписывает испытания на равномерность изменения объема и устанавливает допустимые пределы потерь при прокаливании и содержания растворимых сульфатов для различных бетонов: неармированного, монолитного бетона для внутренних конструкций и сборных бетонных блоков.

Железо и пириты в котельном шлаке могут вызвать образование пятен на поверхности бетона и должны быть удалены. Неравномерности изменения объема вследствие наличия сильно обожженной извести мож-

---

<sup>1</sup> Подробные данные о свойствах легких бетонов на пористых заполнителях приведены в [36]. (Прим. ред.)

но избежать, оставляя шлак во влажных условиях в течение нескольких недель: известь погасится и не будет вызывать расширения бетона.

Коксовый шлак — материал, аналогичный котельному шлаку. Между этими двумя материалами нельзя провести резкой границы.

При применении котельных шлаков в качестве мелкого и крупного заполнителя можно получить бетон с объемной массой 1120—1360 кг/м<sup>3</sup>, но часто для улучшения удобообрабатываемости смеси применяют природный песок, тогда объемная масса бетона составляет 1760—1840 кг/м<sup>3</sup>.

Порошкообразная топливная зола является остатком от горения пылевидного угля на современных электростанциях. Ее можно превратить в гранулы, а затем произвести спекание. Небольшое количество несгоревшего топлива, находящееся в золе, поддерживает горение. Спекшиеся гранулы являются хорошим заполнителем с объемной массой около 960 кг/м<sup>3</sup>. Общие требования к легким заполнителям приведены в Технических условиях ASTM C 330—53T.

### БЕТОН НА ЛЕГКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ

Мы уже видели, что бетон на легких заполнителях может иметь объемную массу от 320 до 1840 кг/м<sup>3</sup> и соответственно прочность от 3,5 до 352 кгс/см<sup>2</sup>. Для любого заполнителя прочность возрастает с повышением плотности, но в зависимости от вида заполнителя для получения бетона с прочностью около 200 кгс/см<sup>2</sup> необходим расход цемента от 240 до 400 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона. Соответственно для получения прочности бетона около 300 кгс/см<sup>2</sup> нужно от 330 до 500 кг цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона.

Бетоны на легких заполнителях, даже схожих внешне, значительно различаются по структурным свойствам, поэтому применению каждого нового заполнителя должна предшествовать тщательная проверка. Основное, на что обычно обращают внимание, удобообрабатываемость бетона, его усадка при высыхании и теплопроводность. Другие свойства, такие как прочность и теплопроводность, тесно связаны с плотностью. Следует учитывать также стоимость бетона.

Многие легкие заполнители угловаты и имеют шероховатую поверхность. При их применении получают жесткие смеси, более пригодные для изготовления сборных блоков, чем монолитного бетона. Удобообрабатываемость бетонной смеси может быть улучшена при применении мелкого заполнителя обычного веса, но плотность и теплопроводность таких бетонов выше, чем при использовании легкого заполнителя. Жесткость легкобетонной смеси можно уменьшить, по крайней мере частично, применением воздухововлекающих добавок.

Большинство легких заполнителей характеризуется высоким водопоглощением, но можно сделать их водонепроницаемыми, покрытием битумом.

Если этого не сделать, значительное количество воды будет абсорбировано заполнителем при перемешивании, что приведет к увеличению объемной массы бетона и снижению его теплоизоляционных свойств.

При применении легкого заполнителя в железобетоне следует об-



ратить особое внимание на защиту арматуры от коррозии. Для этой цели применяют покрытие арматуры жирным цементным раствором, увеличенный защитный слой или оштукатуривание легкогобетонной поверхности. В бетонах на топливных шлаках опасность коррозии увеличивается вследствие присутствия серы в заполнителе, в этом случае защитное покрытие арматуры обязательно. Для всех бетонов на легких заполнителях характерны большая теплопроводность, чем в случае бетонов нормального веса, и большая усадка (на 5—40% больше, чем у обычных бетонов). У бетонов на керамзите, а также на шлаковой пемзе усадка меньше.

В связи с относительно низкой прочностью на растяжение<sup>1</sup> бетона на легком заполнителе возникает опасность усадочных трещин, хотя она частично компенсируется более низким динамическим модулем упругости и большей растяжимостью легких бетонов. Следует предусматривать усадочные швы, а также предохранительные меры, позволяющие избежать разрушений вследствие перемещения влаги.

Ползучесть легких бетонов находится в тех же пределах, что и у обычных бетонов. Установлено, что коэффициент Пуассона такой же, как у обычного бетона. Модуль упругости составляет от  $\frac{1}{2}$  до  $\frac{3}{4}$  его величины для обычного бетона той же прочности. Характерные величины приведены на рис. 6. 5.

**Таблица 9.1. Коэффициент термического расширения бетонов на легких заполнителях**

Заполнитель	Линейный коэффициент термического расширения (в интервале от $-22^{\circ}\text{C}$ до $51,7^{\circ}\text{C}$ ) $\times 10^{-6}$ на $1^{\circ}\text{C}$
Пемза . . . . .	3,2—3,6
Перлит . . . . .	2,6—3,7
Вермикулит . . . . .	2,8—4,7
Котельные шлаки . . . . .	Около 1,2
Керамзит . . . . .	2,2—2,7
Шлаковая пемза . . . . .	2,3—3,7

Рост прочности легкого бетона аналогичен обычному бетону при одинаковых условиях твердения.

Звукопоглощение легкого бетона можно измерить, так как возникающая в воздухе звуковая энергия превращается в тепловую в порах бетона, коэффициент его звукопоглощения в два раза больше, чем у обычного бетона. Однако оштукатуренная поверхность сильнее отражает звук.

Некоторые значения коэффициента термического расширения бетона приведены в табл. 9. 1. Из сравнения с рис. 7. 24 видно, что бетон на

<sup>1</sup> Отношение прочности на растяжение к прочности при сжатии бетонов на легких заполнителях равно 0,2, т. е. больше, чем у обычных бетонов. Для ячеистых бетонов это отношение равно 0,3.

легких заполнителях имеет обычно меньшее тепловое расширение, чем обычный бетон.

Огнестойкость бетона на легких заполнителях, как правило, выше, чем при применении обычных заполнителей (табл. 9.2).

Таблица 9.2. Огнестойкость пустотелых стеновых блоков

Заполнитель	Минимальная эквивалентная толщина в см для оценки огнестойкости			
	4 ч	3 ч	2 ч	1 ч
Шлаковая или природная пемза .	11,7	10,2	8,1	5,34
Керамзит (вспученная глина или сланец) . . . . .	14,5	12,2	9,6	6,6
Известняк, котельные шлаки, не-вспученный шлак . . . . .	15	12,7	10,2	6,85
Гравий из карбонатных пород . .	15,8	13,5	10,7	7,1
Кремнистый гравий . . . . .	17	14,5	11,4	7,6

В табл. 9.3 приведены суммарные свойства различных легких бетонов, полученные на основании данных Строительной исследовательской станции. Следует подчеркнуть, что приведенные величины типичные, но не регламентированные. Плотность и объемная масса бетона определены в высушенном состоянии, удобном для сравнения, которое легче воспроизвести, но это не условия реальной эксплуатации бетона.

Из конструктивных легких бетонов с замкнутой структурой, о которых говорилось выше, делают сборные блоки. Несущие монолитные стены делают из бетона с ячеистой структурой. Это достигается введением в смесь большего количества крупного легкого заполнителя с соответствующим уменьшением количества мелкого заполнителя. Такой бетон напоминает беспесчаный.

Нужно, чтобы все частицы заполнителя были полностью покрыты пленкой цементного теста, но обеспечение удобоукладываемости и определение необходимого содержания воды не является простым делом. Простой, хотя и не научный способ определения консистенции бетонной смеси: это сжать в руке комок бетона, а затем бросить его; если ладонь запачкана раствором, смесь подобрана правильно; если на ладони отдельные пятна, смесь сухая; если ладонь покрыта раствором, смесь слишком жидкая и бетон соответственно имеет более высокую объемную массу и худшие теплоизоляционные свойства. При наличии опыта консистенцию смеси можно также определять на глаз, но различные заполнители по-разному меняют внешний вид смеси.

Прочность неконструктивных легких бетонов не имеет большого значения. Главные требования — это теплоизоляция, хорошая поверхность под штукатурку и не очень большая усадка. В некоторых случаях важна гвоздимость и легкость резания (последнее для сборных блоков).

Таблица 9.3. Основные свойства легких бетонов [9.3]

Бетон	Объемный вес заполнителя в кг/м <sup>3</sup>	Состав смеси по объему цемент: заполнитель	Объемная масса бетона в сухом состоянии в кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии в кгс/см <sup>2</sup>	Усадка при высыхании X 10 <sup>-3</sup>	Теплопроводность в ккал/м <sup>2</sup> .ч.х X град/м	Примечание
Ячеистый	—	Цементное тесто	{ 336—833 608	4, 9—35, 9	3300—4400	0, 07—0, 15	Нормальное твердение Автоклавная обработка
	960 (на пылевидной золе), 1600 (на молотом песке)	1:3 до 1:1	{ 720—1220 720—1220	21, 1—52, 7	1800—3600	0, 17—0, 32	
На топливном шлаке	960	1:6	1380	59, 8	650	0, 26—0, 32	Типичный при-мер
	960	1:9	1250	28, 1	550	—	
На шлаковом пемзе	480—800	{ 1:6	1280—1520	21, 1—140, 6	400—600	—	—
		{ 1:12	960—1520	14, 1—35, 2	300—500	—	
	«Вес пера»	{ 1:8	640	7	1200	0, 1	—
		{ 1:6	1280	24, 6—38, 7	800—650	—	
На керамзите (вспученной глине)	528—1040	1:6	1200	140, 6	550 } 500 }	0, 26—0, 37	—
		1:12	960	59, 8			

Бетон	Объемный вес заполнителя в кг/м <sup>3</sup>	Состав смеси по объему цемент: заполнитель	Объемная масса бетона в сухом со- стоянии в кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии в кгс/см <sup>2</sup>	Усадка при высыхании × 10 <sup>-6</sup>	Теплопро- водность в ккал/м <sup>2</sup> ·ч· Х град/м	Примечание
На вспученном сланце	815	1:6	1300	98,4	450	—	—
		1:9	1170	56,3	400	—	—
На пылевидной золе	960	1:6	1200—1280	77,3	450	0,26	Блоки заводско- го изготовления
		1:9	1120—1200	52,7	450	—	То же
		1:6	1470	105,5	—	—	Вибрированный бетон
		1:4	1540	193,3	—	—	То же
Пемзобетон	480—880	1:6	720—1120	14,1—38,7	400—800	0,17—0,26	—
Вермикулитобетон	64—192	1:9 до 1:5	415—800	6,7—11,3	3000—4000	0,08—0,17	—

Понятие «низкое водоцементное отношение» относится к бетону на легких заполнителях как и к обычному бетону, поэтому при применении легких заполнителей можно следовательно принятому порядку подбора состава бетона.

Очень трудно определить, какое количество от общего содержания воды в смеси поглощается заполнителем и сколько действительно заполняет поры в бетоне, т. е. является частью цементного камня. Трудность заключается не только в очень большой величине водопоглощения легких заполнителей (в ряде случаев до 20%), но также и в том, что процесс водопоглощения может продолжаться в течение ряда дней.

Таким образом, номинальное водоцементное отношение зависит от скорости водопоглощения в период перемещения, а не только от содержания влаги в заполнителе. Вследствие этого использование водоцементного отношения в расчетах при проектировании состава бетона затруднительно. Поэтому предпочтительнее установление соотношений между ингредиентами на основе содержания цемента, хотя при использовании окатанного легкого заполнителя с покрытой или уплотненной поверхностью и относительно низким водопоглощением применимы стандартные методы проектирования состава бетона.

Искусственные легкие заполнители обычно совершенно сухие и склонны к расслоению. Если заполнитель насыщен водой до перемешивания, прочность бетона на 5—10% ниже, чем при сухом заполнителе, при том же содержании цемента и удобообрабатываемости. В последнем случае часть воды затвердения поглощается до схватывания. Эта вода обеспечивает удобообрабатываемость в период укладки. Более того, объемная масса бетона, приготовленного на насыщенном заполнителе, выше, а долговечность такого бетона, особенно его морозостойкость, уменьшается. С другой стороны, при применении заполнителя с высоким водопоглощением трудно приготовить достаточно удобообрабатываемую и связную смесь, поэтому заполнители с водопоглощением более 10% предварительно увлажняются.

Метод проектирования состава бетона Американского института бетона можно применять для заполнителей с любой влажностью. Этот метод не требует определения водопоглощения или удельного веса легкого заполнителя, так как основой проектирования является пробный замес. Но действительное содержание влаги в заполнителе должно быть известно и оно должно оставаться постоянным для всех смесей.

У многих заполнителей удельный вес частиц меняется с их размерами. Мелкие частицы тяжелее, чем крупные. Поэтому процент мелкого заполнителя по весу должен быть больше, чем в бетоне на обычных заполнителях.

Таким образом, конечный объем пор, содержание цементного теста и удобообрабатываемость смеси определяются объемом, занимаемым каждой фракцией, а не весом. Заполнитель с хорошей гранулометрией и минимальным объемом пор требует умеренного содержания цемента

и позволяет получать бетон со сравнительно малыми усадкой при высыхании и теплопроводностью.

При максимальной крупности заполнителя 1,9 см мелкий заполнитель обычно составляет 40—60% общего объема заполнителя в сухом рыхлом состоянии. Часто удобно начинать с равных объемов мелкого и крупного заполнителя, а затем вносить уточнения. Делается пробный замес с требуемой удобообрабатываемостью при данном содержании цемента. Очень жидкая консистенция (осадка конуса 7,6 см) нежелательна, так как может произойти расслоение: отделение раствора или всплытие на поверхность крупного заполнителя. Зная содержание влаги в заполнителе и объемную массу бетона, можно определить состав смеси. Обычно делают три пробных замеса с разным содержанием цемента, но все с требуемой удобоукладываемостью. Существует связь между содержанием цемента и прочностью при данной консистенции смеси. Общие данные приведены в табл. 9.4, но значения для различных заполнителей изменяются в широком диапазоне.

Таблица 9.4. Приблизительная связь между прочностью бетона на легких заполнителях и расходом цемента

Прочность при сжатии стандартных цилиндров в кгс/см <sup>2</sup>	Расход цемента в кг/м <sup>3</sup>
140	225—392
210	280—445
280	332—505
350	392—558

Пропорции различных пробных замесов можно отнести к первому замесу с удовлетворительной удобоукладываемостью, используя так называемый фактор удельного веса, который выражается отношением веса сухого заполнителя к занимаемому им пространству. Это пространство — объем бетона за вычетом абсолютного объема цемента и объема воды, включая и воду, поглощенную во время перемешивания. Для данного заполнителя при данной влажности объем воды, поглощенной при перемешивании, приблизительно постоянен. Поэтому можно заменить реальный удельный вес фактором удельного веса, величина которого, естественно, различна для мелкого и крупного заполнителя.

### **ЯЧЕЙСТЫЙ БЕТОН**

Как отмечалось выше, один из способов получения легкого бетона заключается во внедрении пузырьков газа в пластичную цементную смесь для получения материала с ячеистой структурой, напоминающей губчатую резину. Такой бетон называют ячеистым или аэрированным.

Существуют два метода получения такого материала, каждый из

которых обеспечивает получение конечного продукта определенного названия. Газобетон получается при выделении газа в свежеприготовленный раствор в результате химической реакции. Когда раствор затвердевает, он содержит большое количество пузырьков газа.

Для этой цели обычно применяют алюминиевую пудру в количестве около 0,2% веса цемента<sup>1</sup>. При взаимодействии алюминиевой пудры с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  или щелочью выделяется водород, образующий пузырьки. Можно применять также цинковый порошок. Иногда применяют перекись водорода, при этом происходит выделение кислорода. Пенобетон получают при введении в бетонную смесь пенообразователей (обычно гидролизованный протеин или мыло), образующих воздушные пузырьки и стабилизирующих их при перемешивании с большой скоростью. Иногда предварительно приготовленную стабильную пену вводят в раствор при перемешивании в обычной бетономешалке. Ячеистый бетон может быть приготовлен с заполнителями и без них; в последнем случае это теплоизоляционный бетон с объемной массой 320  $\text{кг}/\text{м}^3$  или, как исключение, до 190  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Наиболее часто применяют составы с объемным весом 480—1120  $\text{кг}/\text{м}^3$ , являющиеся смесью цемента и очень мелкого или молотого песка. Прочность и теплопроводность ячеистых бетонов, как и других легких бетонов, связана с их объемной массой.

Так, бетон с объемной массой 480  $\text{кг}/\text{м}^3$  будет иметь прочность от 31,6 до 42,2  $\text{кгс}/\text{см}^2$ , а теплопроводность—порядка 0,08  $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}/\text{м}$ . Для бетона с объемной массой 1440  $\text{кг}/\text{м}^3$  соответствующие величины будут приблизительно 126,6—140,6  $\text{кгс}/\text{см}^2$  и 0,31  $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \times \text{град}/\text{м}$ . Для сравнения: теплопроводность обычного бетона равна 13,8  $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}/\text{м}$ . Модуль упругости этих бетонов находится в пределах 0,02—0,04  $\cdot 10^6$   $\text{кгс}/\text{см}^2$ , а ползучесть примерно соответствует ползучести обычных бетонов. Ячеистые бетоны характеризуются высокими тепло- и влажопроводностью и усадкой (большими, чем у бетонов той же прочности на легких заполнителях), но эти показатели могут быть снижены автоклавной обработкой, которая увеличивает также прочность при сжатии (рис. 9.2).

Если бетон подвергают автоклавной обработке, в бетонную смесь вводят добавку пуццоланы или в качестве мелкого заполнителя применяют измельченную топливную золу. При изготовлении, например, швед-

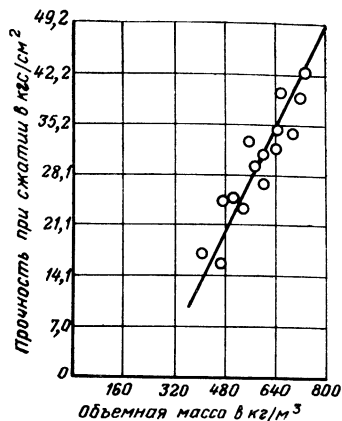


Рис. 9.2. Связь между прочностью и объемной массой газобетона автоклавного твердения

<sup>1</sup> Алюминиевую пудру применяют также в растворах для инъектирования каналов (в конструкциях с последующим напряжением) с целью полного заполнения каналов расширяющимся раствором.

ского материала итонг в смесь вводят известь, а аналогичный по свойствам сипорекс имеет цементную основу.

Ячеистые бетоны применяют преимущественно для теплоизоляции (вследствие их низкой теплопроводности) и как огнестойкие материалы, так как их огнестойкость выше, чем у обычных бетонов. В конструкциях ячеистые бетоны применяют в виде блоков (с автоклавной обработкой) или деталей заводского изготовления, а также для полов вместо пустотелых керамических блоков. Ячеистые бетоны можно пилить, у них хорошая гвоздимость. Хотя водопоглощение ячеистых бетонов достаточно высоко, они долговечны, так как скорость проникания воды в ячеистые бетоны мала и большие поры не заполняют водой при подсосе. Поэтому ячеистые бетоны обладают хорошей морозостойкостью, и их можно применять в конструкциях стен с обязательным оштукатуриванием. Применяются специальные пенообразователи для бетона, придающие ему гидрофобные свойства, но их поведение в длительные сроки в настоящее время проверяется.

### **БЕСПЕСЧАНЫЕ БЕТОНЫ<sup>1</sup>**

Этот вид легких бетонов состоит только из цемента, воды и крупного заполнителя.

Беспесчаный бетон — это скопление частиц крупного заполнителя, каждая из которых покрыта тонким слоем цементного камня толщиной до 0,13 см. Поэтому в теле бетона образуются большие поры, обуславливающие его низкую прочность, но при больших порах не может быть капиллярного движения воды. Хотя прочность беспесчаного бетона значительно ниже, чем обычных бетонов, ее достаточно для зданий высотой до четырех этажей.

Так как беспесчаный бетон не расслаивается, его можно подавать на большую высоту и укладывать высокими слоями. Стоимость беспесчаного бетона сравнительно низкая вследствие малого расхода цемента (в тощих смесях 71—130 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона). Это возможно, так как нет частиц песка, большая поверхность которых требует значительного расхода цемента для их обволакивания.

Объемная масса беспесчаного бетона зависит главным образом от гранулометрического состава заполнителя. Так как заполнители с хорошей гранулометрией дают более плотную упаковку и большую насыпную объемную массу, чем при частицах одного размера, низкая объемная масса беспесчаного бетона получается при однофракционном заполнителе. Обычный размер зерен заполнителя 0,95—1,9 см, но применяют и частицы размером до 5,1 см.

При данной удельной массе заполнителя фракционированный заполнитель дает на 10% большую объемную массу бетона, чем при применении заполнителя одной фракции. Объемная масса беспесчаного бетона

---

<sup>1</sup> Беспесчаный бетон в практике строительства в СССР называют крупнопористым бетоном. Такой бетон нашел применение для изготовления блоков ограждающих конструкций. Свойства крупнопористого бетона на отечественных материалах описаны в [59] (*Прим. ред.*)



на обычных заполнителях колеблется в пределах 1600—1200 кг/м<sup>3</sup> (табл. 9.5), а на легких заполнителях — 640 кг/м<sup>3</sup>.

Объемная масса беспесчаного бетона равна сумме: насыпной объемной массы заполнителя, расхода цемента в кг/м<sup>3</sup> и воды в кг/м<sup>3</sup>. Беспесчаный бетон очень мало уплотняется, и допускается лишь крат-

Таблица 9.5. Основные характеристики беспесчаного бетона с крупностью заполнителя 0,95—1,9 см

Отношение заполнитель: цемент по объему	Водоцементное отношение по весу	Объемная масса в кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии в возрасте 28 суток в кгс/см <sup>2</sup>
6	0,38	2020	147,6
7	0,4	1960	119,5
8	0,41	1930	101,9
10	0,45	1870	70,3

ковременное вибрирование, так как иначе можно удалить цементное тесто.

Прочность беспесчаного бетона колеблется в пределах от 14,1 до 140,6 кгс/см<sup>2</sup>, главным образом в зависимости от его объемной массы (рис. 9.3). Водоцементное отношение само по себе не является главным

контролирующим фактором, но существует оптимальное  $V/C$  для каждого заполнителя. При  $V/C$  больше оптимального цементное тесто будет стекать с зерен заполнителя, а при очень низком  $V/C$  цементное тесто обладает недостаточной адгезией и не достигает необходимого уплотнения. Трудно предсказать оптимальное значение  $V/C$  отчасти потому, что на него влияет водопоглощение заполнителя, но можно принять в качестве предварительного значения расхода воды, равный 180 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона. Тогда  $V/C$  будет зависеть от количества цемента, необходимого для обволакивания зерен заполнителя. Прочность полученного бетона определяется экспериментально. Рост ее во времени происходит аналогично обычному бетону. На практике применяют различные смеси. Предельные значения их от отношения цемент:заполнитель 1:10 по объему (расход цемента 131 кг/м<sup>3</sup>) до 1:20 (расход цемента 71 кг/м<sup>3</sup>).

Физические свойства беспесчаных бетонов изучены сравнительно мало. Величины модуля упругости для бетонов с различной прочностью приведены ниже.

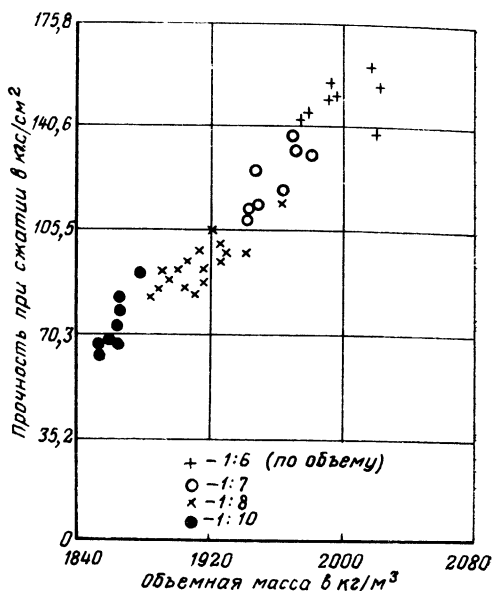


Рис. 9.3. Прочность на сжатие беспесчаного бетона в возрасте 28 сут. как функция его объемной массы в период испытания

Прочность при сжатии в $\text{кгс/см}^2$	Модуль упругости $\times 10^6$ в $\text{кгс/см}^2$
49,2	0,11
35,2	0,09
24,6	0,07

Усадка беспесчаных бетонов значительно ниже, чем обычных ( $120 \times 10^{-6}$ ). Это объясняется тем, что цементный камень расположен тонким слоем на зернах заполнителя и контракция при высыхании сдерживается заполнителем. Так как цементный камень имеет большую поверхность соприкосновения с воздухом, скорость усадки очень велика. Теплопроводность беспесчаных бетонов составляет 0,6—0,8 от обычных, а величина коэффициента термического расширения зависит от вида заполнителя.

Беспесчаный бетон морозостоек (так как в нем нет капилляров) при условии, что поры не насыщены водой, в противном случае замораживание вызывает быстрое разрушение. Высокое водопоглощение беспесчаного бетона не позволяет применять его в фундаментах, а также, если возможен контакт с водой. Максимальное водопоглощение должно быть не более 25% по объему (или половина этой величины по весу), но в обычных условиях поглощенная вода составляет более  $\frac{1}{5}$  максимальной величины. Тем не менее наружные стены должны быть оштукатурены с двух сторон, что способствует также снижению воздухопроницаемости. Штукатурка и окраска снижает звукопоглощение беспесчаного бетона (закрывая его поры), поэтому если акустические свойства являются определяющими, стены штукатурят лишь с одной стороны.

Коэффициент теплопроводности беспесчаных бетонов составляет 0,55—0,85  $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град/м}$  при применении обычного заполнителя и 0,18  $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град/м}$  — легкого заполнителя. Высокая влажность бетона увеличивает его теплопроводность.

Беспесчаный бетон обычно не армируют, но, если это необходимо, арматура должна быть защищена слоем цементного камня (толщиной 0,3 см) для улучшения сцепления и защиты от коррозии. Наиболее простой способ нанесения покрытия на арматуру — торкретирование.

### БЕТОН НА ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛКАХ

Иногда нужно получить бетон с хорошей гвоздимостью. В этом случае в качестве заполнителя применяют древесные опилки. Гвоздимый бетон — материал, в который можно забить гвоздь и в котором он хорошо держится. Последнее уточнение сделано потому, что в некоторые легкие бетоны можно забивать гвозди, но они там не держатся. Гвоздимость требуется в конструкциях крыш, в сборных элементах зданий и др. Вследствие высокой влажопроводности бетон на древесных опилках не-

применим при возможном усложнении. Он приготавливается из равных по объему частей портландцемента, песка и сосновых опилок. Осадка конуса смеси 2,5—5 см. Такой бетон обладает хорошим сцеплением с обычным бетоном и является отличной изоляцией. Опилки должны быть чистыми и не содержать большого количества коры, так как в ней много органических компонентов, препятствующих гидратации. Химическая обработка древесных опилок устраняет опасность их гниения и снижает теплопроводность. Предпочтительнее опилки размером от 0,63 до 0,15 см. Приготовление пробного замеса является обязательным.

Бетон на древесных опилках имеет прочность 2,8—7 кгс/см<sup>2</sup>. Гвоздимый бетон можно также приготовить на других заполнителях: шлаковой пемзе, пемзе, вулканическом шлаке и перлите.

### ОСОБОТЯЖЕЛЫЙ БЕТОН

В последние годы бетону найдено новое применение — биологическая защита ядерных реакторов. Так как способность бетона поглощать  $\gamma$ -лучи пропорциональна его объемной массе, толщина защитного экрана может быть уменьшена при применении бетона с большей объемной массой.

Проблема защиты в действительности сложнее, так как для ослабления потока нейтронов в защитный экран должно быть включено определенное количество материала с малым атомным весом, как, например, водород. Бетон, как обычный, так и особотяжелый, содержит тяжелые и легкие компоненты, и было установлено, что при десятилетней эксплуатации в потоке  $10^{11}$  нейтрон/см<sup>2</sup> максимальная температура и температурный градиент не превысили допускаемые пределы.

Для повышения объемной массы бетона часть заполнителя или весь заполнитель заменяется материалом с очень большой удельной массой, обычно более 6,4 г/см<sup>3</sup> (а у обычного заполнителя 2,6 г/см<sup>3</sup>). Применяют естественные и искусственные тяжелые заполнители.

Одним из наиболее употребительных естественных заполнителей является барит (сульфат бария) с удельной массой 6,55 г/см<sup>3</sup>. Он встречается в виде горной породы, содержащей до 95% минерала. Барит не отличается от щебня других пород и назначение состава смеси не вызывает особых трудностей. Барит хрупок и сильно пылит, что следует учитывать при транспортировании и не допускать повторного перемешивания бетонной смеси. Желательно приготовление пробных замесов, так как мелкий баритовый заполнитель замедляет схватывание и твердение.

Баритовый бетон не атмосферостоек, но для большинства случаев применение особотяжелых бетонов это не имеет значения. Модуль упругости и коэффициент Пуассона баритового бетона такие же, как у обычных бетонов, а усадка меньше на  $\frac{1}{4} - \frac{1}{3}$ . Коэффициент термического расширения баритового бетона в интервале температур от 4 до 38°С вдвое больше, чем у обычного бетона; удельная теплоемкость, теплопроводность и теплоперенос значительно ниже, чем соответствующие им величины у бетона на обычном заполнителе.

Объемная масса бетона зависит от состава смеси: для смеси 1:4, 6:6,4 при  $V/C=0,58$  она составляет порядка  $3670 \text{ кг/м}^3$ . Прочность такого бетона, определенная на стандартных цилиндрах в возрасте 28 суток, равна  $430,9 \text{ кгс/см}^2$ . При  $V/C=0,9$  прочность бетона  $246,1 \text{ кгс/см}^2$ .

Результаты испытаний приведены на рис. 9.4. Следует заметить, что благодаря большой удельной массе заполнителя особотяжелые бетоны имеют малый расход цемента по весу. Чтобы сравнить действительные объемные соотношения с обычным бетоном, вес барита нужно умножить на отношение  $\frac{2,6}{4,1}$ .

Другим видом природного тяжелого заполнителя является железная руда: магнетит, лимонит, гетит. Ильменит ( $\text{FeTiO}_3$ ) применяют в качестве мелкого заполнителя. Железные руды пылят и имеют высокое водопоглощение, но дают бетон с объемной массой  $3040\text{—}3920 \text{ кг/м}^3$ .

Кристаллизационная вода, содержащаяся в лимоните, является надежным источником образования водорода для замедления потока нейтронов, при этом температура должна быть не выше  $200^\circ \text{C}$ .

Применяют также искусственные тяжелые заполнители,

большой частью чугуна, а иногда и свинец. Чугунная дробь позволяет получать бетон очень большой массы (до  $5500 \text{ кг/м}^3$ ), но она в шесть раз дороже природных тяжелых заполнителей. Бетон с чугунной дробью склонен к расслоению из-за несоответствия удельных весов стали (применяемый в качестве крупного заполнителя) и обычного песка (мелкий заполнитель).

Применяют также чугунный лом и обрезки стержней, которые несколько дешевле, чем дробь, но возникают дополнительные трудности в перемешивании бетонной смеси из-за формы заполнителя. Следует помнить, что металл должен быть очищен от масла, препятствующего сцеплению.

При укладке особотяжелых бетонов применяют метод раздельной укладки бетонной смеси; это уменьшает расслоение, особенно при использовании обычного мелкого заполнителя.

Не следует забывать, что кроме защиты от радиации бетон, применяемый в защитных экранах, должен обладать и другими свойствами, необходимыми для эксплуатации при высоких температурах: к ним относятся теплопроводность, усадка, коэффициент термического расширения и ползучесть. Так как эти требования трудновыполнимы, в ряде случаев предпочитают делать толстые защитные экраны из бетона на обычных заполнителях.

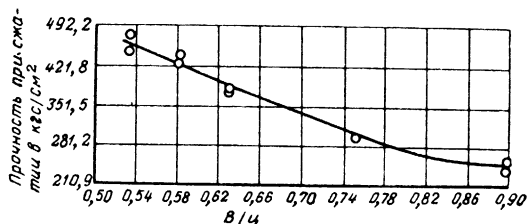


Рис. 9.4. Связь между прочностью цилиндров в возрасте 28 сут. и водоцементным отношением для бетона на баритовом заполнителе

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА  
БЕТОНА<sup>1</sup>**

---

Свойства бетона исследуют главным образом с целью проектирования состава бетона, поэтому в этой главе будут рассмотрены различные свойства бетона.

Требуемые свойства затвердевшего бетона определяются при проектировании конструкций, а свойства бетонной смеси устанавливают в зависимости от вида конструкции и способов ее укладки и транспортирования. Проектирование состава бетона — это процесс выбора необходимых компонентов бетона и определение их соотношения для получения наиболее экономичным путем бетона с минимумом заданных свойств, а именно необходимой консистенцией бетонной смеси, прочностью и долговечностью.

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

---

Выше подчеркнуты два основных положения проектирования состава бетона: бетон должен обладать определенными свойствами и быть возможно более экономичным.

**СТОИМОСТЬ**

Стоимость бетонной конструкции, как и любой другой, складывается из стоимости материалов, оборудования и трудозатрат. Колебания в стоимости материалов определяются тем, что цемент во много раз дороже заполнителя, поэтому при проектировании состава бетона, естественно, стремятся применять как можно более тощие смеси.

Применение относительно тощих смесей имеет и ряд технических преимуществ не только в массивных конструкциях, где значительное тепловыделение при гидратации может вызвать образование трещин, но и в тонкостенных конструкциях, где при жирных смесях увеличивается усадка и образуются трещины. Из сказанного выше следует, что применять жирные смеси нецелесообразно не только с экономической точки зрения.

При определении стоимости бетона следует учитывать также изменчивость прочности, так как при проектировании конструкции задается минимальная прочность, являющаяся критерием при приемке бетона,

---

<sup>1</sup> Глава «Проектирование состава бетона» подверглась существенному сокращению в части описания принятых в Англии и США методов определения состава бетона. Эти методы близки к применяемым в СССР и не имеют особых преимуществ, а использование таблиц и зависимостей невозможно из-за различий в системе измерений. За последние годы вышел целый ряд руководств по определению состава бетона, к которым мы и отсылаем читателя [60, 61, 62, 63]. (Прим. ред.)

а реальная стоимость бетона определяется материалами, обуславливающими заданную среднюю прочность. Это тесно связано с вопросом контроля качества. Контроль качества предусматривает технический надзор и тщательное приготовление смеси, но бывают случаи, когда эти требования не могут быть выполнены. Решение о степени контроля качества бетона зависит от вида и объема работ и принимается исходя из экономических соображений. Стоимость трудозатрат в значительной мере зависит от удобоукладываемости бетонной смеси: недостаточная удобоукладываемость при данных способах уплотнения приводит к высокой стоимости работ (или к недостаточному уплотнению бетона). Даже при достаточной механизированности, например в дорожном строительстве, стоимость укладки очень жестких смесей высока.

Стоимость трудозатрат зависит также от организации работ и вида применяемого оборудования.

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Этот большой вопрос будет затронут здесь лишь в той мере, в какой он влияет на проектирование состава бетона. В прошлом, а иногда и сейчас, технические требования к бетону предписывают определенное соотношение цемента и мелкого и крупного заполнителя. На этой основе были выработаны традиционные составы, но из-за применения различных составляющих бетонные смеси с одним и тем же отношением цемент:заполнитель и данной удобоукладываемостью образуют бетоны с различной прочностью. Поэтому минимальная прочность на сжатие была позднее включена во многие технические требования. Это позволяет соблюдать технические требования при хорошем качестве материалов; в других же случаях оказывается невозможным достичь необходимой прочности при заданном составе смеси. Поэтому требования иногда включают также гранулометрический состав и форму зерен заполнителей. В ряде стран гранулометрический состав природных заполнителей таков, что вводить эти ограничения часто неэкономично. Кроме того, комплекс требований по прочности, соотношению составляющих бетонной смеси, форме и гранулометрическому составу заполнителей исключает возможность экономии при проектировании состава бетона и делает невозможным производство дешевого бетона на основе изучения его свойств. Количество регламентируемых показателей уменьшается, но тем не менее в технических требованиях приводятся для ориентировки и традиционные составы для тех, кто не хочет заниматься контролем качества бетона.

Регламентируемые величины должны обеспечить ряд свойств, основные из которых:

1. Минимальная прочность на сжатие, необходимая из конструктивных соображений.

2. Максимальное водоцементное отношение и в определенных климатических условиях — минимальное содержание вовлеченного воздуха для обеспечения долговечности.

3. Предельно допустимый расход цемента, позволяющий избежать трещин вследствие температурных перепадов в массивных конструкциях.

4. Максимальный расход цемента для предупреждения образования усадочных трещин при очень низкой влажности.

5. Минимальная объемная масса для гравитационных плотин и подобных сооружений.

Эти показатели должны быть учтены при проектировании состава бетона. Они являются основой для выбора вида и соотношения компонентов бетонной смеси. Британский стандарт CP 114—1957 на применение железобетона в строительстве допускает использование обычных и специальных составов. В первом случае исходят из соотношения между компонентами бетонной смеси. При этом прочность должна быть не более чем на 25% ниже или выше минимальной. Допускаемые напряжения также должны колебаться в этих пределах. Специальные составы проектируют исходя только из прочности, но дается предел отношения цемент:заполнитель — смесь не должна быть более тощей, чем 1:8 при максимальной крупности заполнителя 1,9 см и чем 1:9 при максимальной крупности заполнителя 3,8 см. Эти бетоны должны быть изготовлены на портландцементе или шлакопортландцементе и иметь кубиковую прочность в 28 суток 158—422 кгс/см<sup>2</sup>.

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕТОННОЙ СМЕСИ**

При определении соотношения компонентов бетонной смеси в конечном итоге должно быть определено количество каждого компонента смеси на один замес. Существуют различные методы определения состава смеси. Например, по методу Американского института бетона содержание воды в килограммах на 1 м<sup>3</sup> бетона определяется непосредственно по удобоукладываемости смеси (с учетом максимальной крупности заполнителя), а не по водоцементному отношению и отношению заполнитель : цемент. Следует заметить, что проектирование в прямом смысле слова невозможно, так как применяемые материалы различны и многие их свойства не могут быть оценены количественно; в действительности, мы просто находим оптимальные комбинации компонентов на основе зависимостей, установленных в предыдущих главах.

Поэтому неудивительно, что для того, чтобы получать удовлетворяющий нас состав, мы должны не только рассчитать соотношение применяемых материалов, но и сделать пробные замесы. Свойства бетона, полученного в этих замесах, позволяют внести коррективы в состав, и это делается до тех пор, пока не получают удовлетворительных результатов.

Пробные замесы в лаборатории не позволяют сделать окончательных выводов, даже если учтена влажность заполнителя. Только при изготовлении бетонной смеси и укладке ее в производственных условиях можно гарантировать, что все свойства бетона будут отвечать требованиям для конкретных условий его эксплуатации. Для подтверждения этого могут быть отмечены два положения: смеситель, применяемый в лаборатории, обычно не тот, что в производственных условиях; величина отношения поверхности к объему в лабораторных образцах больше, чем в конструкции, так что требуемое содержание песка в смеси, определенное в лаборатории, может быть неоправданно велико.

Другие факторы, например погрузка, транспортирование, укладка бетонной смеси, атмосферные условия могут также влиять на свойства бетона, но они являются второстепенными и требуют лишь минимальных уточнений при проектировании состава бетона непосредственно при проведении работ. Очевидно, что при проектировании состава бетона нужны знания его свойств и определенный опыт.

### **ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЫБОР СОСТАВА БЕТОННОЙ СМЕСИ**

В этом разделе мы остановимся на выборе состава наиболее дешевой бетонной смеси, удовлетворяющей нашим требованиям как в свежем состоянии, так и после твердения. Учитывая факторы, приведенные на схеме рис. 10.1, и постепенно двигаясь сверху вниз, определим окончательный состав бетонной смеси.

### **ПРОЧНОСТЬ**

Это одно из наиболее важных свойств бетона как само по себе, так и потому, что оно влияет на многие другие свойства затвердевшего бетона. Под прочностью подразумевают прочность при сжатии, измеряемую в определенном возрасте, обычно в 28 суток. Величина ее определяет водоцементное отношение бетонной смеси. На рис. 10.1 эта зависимость приведена для бетонов нормального твердения на поргладцементе. Если в течение всей работы применяется один и тот же цемент, можно использовать экспериментальную зависимость между прочностью и водоцементным отношением.

Если используются кривые, аналогичные приведенным на рис. 10.1, необходимо знать вид применяемого цемента, так как скорость твердения различных видов цементов различна, хотя у бетонов на различных цементах, испытанных в возрасте 1—2 лет и старше, прочность практически одна и та же. На прочность высокопрочных бетонов (от 350 кгс/см<sup>2</sup> и выше) влияет также отношение заполнитель:цемент.

### **ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ СРЕДНЕЙ И МИНИМАЛЬНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ**

При расчете конструкций исходят из предполагаемой минимальной прочности бетона. Действительная прочность бетона, изготовленного на строительной площадке или в лаборатории, колеблется в определенных

*Таблица 10.1. Количество образцов в %, имеющих прочность ниже значения  $\bar{X}-K\sigma$*

K	Количество образцов в %, имеющих прочность ниже ( $\bar{X}-K\sigma$ )
1	15,9
1,5	6,7
1,96	2,5
2,33	1
2,5	0,6
3,09	0,1



пределах. Поэтому при проектировании состава бетона мы должны принимать среднюю прочность выше минимальной.

Распределение прочности испытуемых образцов может быть описано средним и стандартным отклонением. Зная, что образцы могут иметь прочность, отличающуюся от средней на определенную величину (табл. 10.1), мы можем определить минимальную прочность данного состава. Абсолютный минимум не может быть определен, так как с точки зрения статистики всегда имеется вероятность, что результаты испытаний будут ниже минимума, как бы мал он ни был.

Поэтому обычно «минимум» определяют как величину, включающую абсолютное большинство результатов испытаний, обычно 95—99%. Такое определение применяют в «Технических требованиях к бетону», но важно установить, относится ли это требование к одному образцу или к каждой группе одновременно испытываемых образцов. Вероятность того, что средний результат по группе будет ниже минимума, меньше, чем для одного кубика. Британский стандарт CP 114—1957 устанавливает, что средний результат испытания трех кубов в одном возрасте не должен быть меньше минимума. Результат испытания отдельного образца может быть меньше минимального, но разница между максимальным и минимальным результатом испытаний не должна составлять более 20% среднего результата испытаний.

Требования технических условий могут отличаться, например, может быть установлено следующее:

- а) среднее каждого пяти результатов испытаний не должно быть меньше определенного минимума;
- б) 90% всех результатов испытаний должны быть не меньше минимума;
- в) ни один результат не должен быть менее 80% минимума.

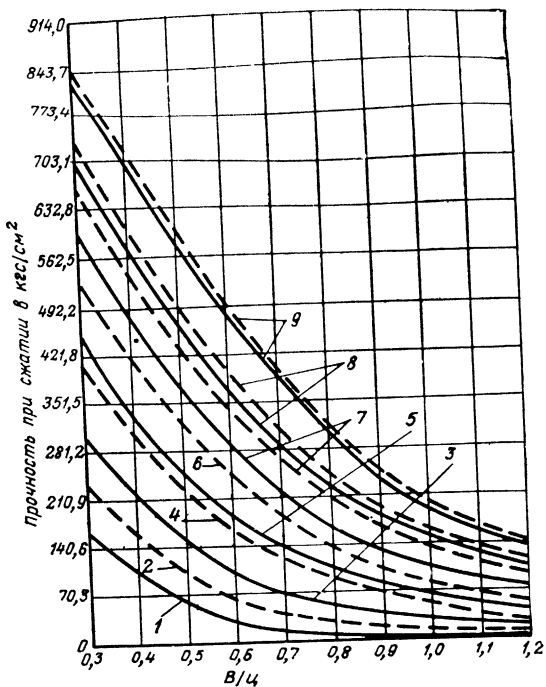


Рис. 10.1. Зависимость между прочностью при сжатии и водоцементным отношением для уплотненного бетона различного состава (образцы-кубы с размером сторон 10,2 см)

— обычный портландцемент; - - - - - быстротвердеющий; возраст: 1 и 2 — 1 сут.; 3 и 4 — 3 сут.; 5 и 6 — 7 сут.; 7 — 28 сут.; 8 — 3 мес.; 9 — 1 год

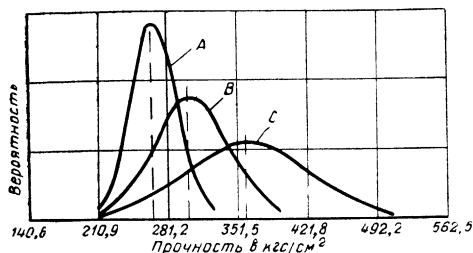


Рис. 10.2. Нормальная кривая распределения для бетонов с минимальной прочностью (включающей 99% результатов) 210,9 кгс/см<sup>2</sup>

	$\bar{X}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma$ , кгс/см <sup>2</sup>
A	267,2	24,6
B	302,3	39,4
C	358,5	63,3

Таким образом, кроме инженерного опыта необходимо также применение математической статистики.

Мы помним (глава 8), что абсцисса каждой точки нормальной кривой распределения может быть выражена членом стандартного отклонения  $\sigma$  и что количество образцов, прочность которых отличается от средней более чем на  $K\sigma$ , представлено в соответствующей области ниже нормальной кривой и дано в статистических таблицах (табл. 10.1).

Таким образом, если средняя прочность образца-кубика  $\bar{X}$ , а процент образцов, прочность которых может быть меньше данной величины ( $\bar{X}-K\sigma$ ), установлен, величину  $K$  можно определить по статистическим таблицам, а разница между средним и минимальным значением  $K\sigma$  будет зависеть только от величины стандартного отклонения  $\sigma$ . Это показано на рис. 10.2.

Таблица 10.2. Зависимость между минимальной и средней прочностью при сжатии кубов и коэффициентом вариации

Степень контроля	Условия	Минимальная прочность в % от средней	Коэффициент вариации для вероятности значений кубиковой прочности меньше минимальной, составляющей	
			одну из 100	одну из 200
Отличный	Весовая дозировка, применение фракционированных заполнителей, определение влажности заполнителей и т. д. Постоянный надзор . . . . .	75	10,7	9,7
Удовлетворительный	Весовая дозировка, применяются только две фракции заполнителя, содержание воды контролирует машинист бетономешалки. Случайный надзор . .	60	17,2	15,5
Слабый	Приблизительная объемная дозировка заполнителей. Отсутствие надзора . . . . .	40	25,8	23,3

Так как содержание цемента в смеси зависит от средней прочности, то чем больше стандартное отклонение, тем больший расход цемента требуется при данной минимальной прочности. Разность  $(\bar{X}-K\sigma)$  может быть выражена также через коэффициент вариации  $C = \frac{\sigma}{\bar{X}}$ , как  $\bar{X}$

$(1-KC)$ . Оба эти метода определения минимальной прочности идентичны для бетонов с одинаковой средней прочностью, но если величину, определенную для одного бетона применить для бетона с другой прочностью, результат будет зависеть от того, влияет ли на стандартное отклонение и коэффициент вариации изменение прочности.

Если установлена неизменяемость стандартного отклонения, то, зная его величину  $\sigma$  для бетона одного состава, мы можем подсчитать среднюю прочность любого другого бетона, прибавляя постоянную величину  $K\sigma$  к минимальной прочности. Эта разность между средним и минимальным значением прочности будет постоянной для одного и того же процесса приготовления бетона.

С другой стороны, если коэффициент вариации — постоянная величина, минимальная прочность будет составлять определенную часть средней прочности. Это показано на следующем числовом примере.

Примем, что бетон, приготовленный и испытанный при данных условиях, имеет среднюю прочность  $210,9 \text{ кгс/см}^2$  со стандартным отклонением  $35,2 \text{ кгс/см}^2$ , т. е. несколько лучший, чем при «удовлетворительном» контроле (табл. 10.2). Минимальная прочность, определяемая как прочность, включающая 99% всех результатов, будет

$$210,9 - 2,33 \cdot 35,2 = 129,4 \text{ кгс/см}^2.$$

Из табл. 10.1  $K = 2,33$ .

Представим теперь, что нужно приготовить в тех же условиях бетон с минимальной прочностью  $316,4 \text{ кгс/см}^2$ .

Средняя прочность, согласно «методу коэффициента вариации», будет равна  $\frac{316,4}{1 - 2,33 \cdot 0,167} = 517,5 \text{ кгс/см}^2$ , в то время как величина средней прочности, определенная методом стандартных отклонений, равна  $316,4 + 2,33 \cdot 35,2 = 397,9 \text{ кгс/см}^2$ . Практическое значение разницы между этими двумя методами ясно видно из сравнения стоимости бетона прочностью  $517,5$  и  $397,9 \text{ кгс/см}^2$  при одинаковом контроле.

Таблица 10.3. Значения коэффициента вариации при различной степени контроля по Уокеру

Степень контроля	Коэффициент вариации в %
Достижимая только в хорошо контролируемых лабораторных испытаниях . . . . .	5
Отличная, достигается лабораторная точность . . . . .	10
Отличная . . . . .	12
Хорошая . . . . .	15
Удовлетворительная . . . . .	18
Не вполне удовлетворительная . . . . .	20
Плохая . . . . .	25

Разность между средней прочностью и требуемой минимальной прочностью обязательно должна определяться в начале проектирования состава бетона. До получения первых экспериментальных данных проектировщик может руководствоваться рекомендациями, например «Road Note», № 4. Они устанавливают минимальную прочность на раздавливание кубов в процентах от

средней прочности их для различных условий производства работ. Величины приведены в табл. 10.2.

Проблема постоянства стандартного отклонения или коэффициента вариации все еще дискуссионна, но при постоянной степени контроля результаты лабораторных испытаний и натурных дают постоянный коэффициент вариации для хорошо уплотненных смесей различного состава при прочности более  $105,5 \text{ кгс/см}^2$  (рис. 10.3). Таким

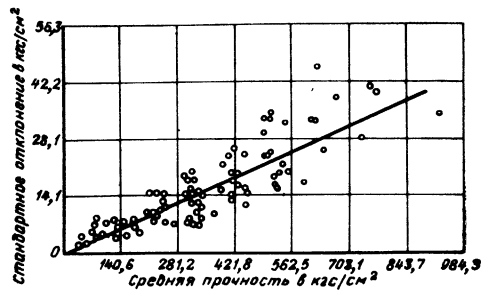


Рис. 10.3. Зависимость между стандартным отклонением и средней прочностью лабораторных образцов кубов (показана линия регрессии)

образом, опыт проектирования состава бетона на основе постоянства коэффициента вариации для всех бетонов, изготовленных с определенной степенью контроля («Road Note», № 4, и работа Уокера) дает в США (табл. 10.3) удовлетворительные результаты.

Нет сомнения, что лучше установить эмпирическую зависимость в реальных условиях строительства, так как для некоторых способов приготовления бетона зависимость между колебаниями прочности и ее средней величиной может быть такова, что разность между средней и минимальной прочностью не будет простой функцией водоцементного отношения. Эрнтрой предлагает определять среднюю прочность в зависимости от определенного процента от водоцементного отношения, регламентированного для минимальной прочности.

### КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

Из рис. 10.3 видно, что чем меньше разность между минимальной и средней прочностью бетона, тем меньше необходимый расход цемента. Фактором, контролирующим эту разность для бетона с данным уровнем прочности, является контроль качества, под которым понимается контроль изменения свойств составляющих бетонной смеси, а также контроль всех операций, обеспечивающих прочность бетона или консистенцию бетонной смеси: дозировки, перемешивания, укладки, хранения и испытания.

Колебания активности цемента были описаны в главе 5. При большом объеме работ можно избежать большей части этих колебаний, применяя цемент одного завода.

Влияние колебания гранулометрического состава заполнителя бы-

ло показано в главе 3. Этот фактор особенно важен при контроле состава смеси по удобоукладываемости при необходимости обеспечения постоянной удобоукладываемости; изменение гранулометрического состава может привести к повышению водопотребности и вызванной этим потерей прочности.

Колебания прочности бетона увеличиваются при неравномерном перемешивании, недостаточном уплотнении и уходе, а также при отклонениях в процессе испытания (описанных в соответствующих главах). Необходимость контроля всех этих факторов на строительстве очевидна. Изменение влажности заполнителей, если оно не компенсируется количеством воды затворения, также оказывает значительное влияние на прочность бетона. Чтобы свести эти изменения к минимуму, складирование материалов должно быть организовано так, чтобы вода могла стекать с заполнителя до его употребления. Машинист бетономешалки должен иметь достаточную подготовку, чтобы поддерживать постоянную удобоукладываемость смеси.

Стандартное отклонение можно приписать любому из факторов в отдельности, хотя в ряде случаев величину влияния каждого из них определить невозможно. Различные стандартные отклонения учитываются результирующим средним квадратичным отклонением  $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ .

Это следует помнить, так как принятие арифметической суммы дает сильно преувеличенное значение общего стандартного отклонения. Знание доли различных факторов в общей изменчивости, определенной статистическими методами, позволяет решить, экономично ли принимать меры для уменьшения этих отклонений или уменьшение отклонений непропорционально мало по сравнению со стоимостью необходимого контроля. На большинстве крупных строек применяется весовая дозировка, но при тщательном контроле и объемной дозировке можно приготовить бетон с малой изменчивостью. Контроль качества иногда считают синонимом приготовления высокопрочного бетона. В действительности это не так. Практикуется изготовление бетона низкой прочности при усиленном контроле, например в массивных конструкциях, в которых получение большого количества тощего бетона при малом разбросе результатов дает большую экономию. Степень контроля оценивается разбросом результатов испытаний, учитываемым коэффициентом вариации. Характеристики различных степеней контроля были даны в табл. 10.2 и 10.3, но более детальные данные для бетона с механизированной укладкой и уплотнением приведены в табл. 10.4.

Наконец, не следует забывать, что контроль включает технический надзор, и отсутствие его вместе с плохим качеством работ может свести на нет все усилия при проектировании состава бетона и установлении технических требований к нему.

По словам Гленвилля, «Различие между хорошим и плохим качеством работ и техническим надзором можно сравнить с различием между почти бесконечным сроком службы (бетона) и сроком всего в несколько лет».

Таблица 10.4. Значения коэффициента вариации при различных видах контроля, по Грехему и Мартину

Коэффициент вариации в %	Нормируемая минимальная прочность в кгс/см <sup>2</sup>	Контроль <sup>1</sup>			технический надзор
		материалов	воды	дозирования	
9—10	218, 2—351, 5	Три фракции крупного заполнителя и мелкий заполнитель — все в пределах допускаемого градиентного состава	Контролируемое водоцементное отношение	Дозирование по весу	Строгий
10—12	218, 2—351, 5	То же	То же	Тщательное дозирование по объему, цемента по весу	»
10—12	218, 2—351, 5	Две фракции крупного заполнителя и мелкий заполнитель — все в пределах допускаемого градиентного состава	»	Дозирование по весу	»
12—13	210, 9—218, 2	То же, с менее жесткими пределами градиентного состава	»	То же	Очень хороший
13—14	210, 9—218, 2	То же	»	Тщательное дозирование по объему, цемента по весу	То же
14—16	210, 9—218, 2	Крупный и мелкий заполнитель	»	Дозирование по весу	Хороший
16—18	140, 6—210, 9	То же	»	Тщательное дозирование по объему, цемента по весу	Удовлетворительный

<sup>1</sup> Бетон с механизированной укладкой и уплотнением.

## ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

Бетон необходимой прочности, тщательно уложенный, долговечен в обычных условиях эксплуатации. Но если нужна не высокая прочность, а повышенная долговечность, то водоцементное отношение определяется требованиями долговечности. Рекомендуемые величины максимального водоцементного отношения для различных условий эксплуатации были даны в табл. 7.5. В табл. 10.5 приведены требования Американского института бетона. Не следует забывать также о применении воздухововлекающих добавок. При возможности химических воздействий на бетон должен быть применен определенный вид цемента. Если единственным требованием долговечности является морозостойкость, выбор типа цемента определяется другими условиями, например быстрым нарастанием прочности или высоким тепловыделением при бетонировании в холодную погоду. Так как вид цемента влияет на раннее развитие прочности, то для обеспечения достаточной прочности в раннем возрасте необходимо применять низкое водоцементное отношение. Таким образом, прочность, вид цемента и долговечность определяют водоцементное отношение — одну из основных величин в расчете состава бетонной смеси.

## УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТЬ

Удобоукладываемость зависит от двух факторов: первый — размеры бетонируемой части конструкции, количество и расположение арматуры; второй — используемый метод уплотнения. Очевидно, что при узком и сложном участке бетонирования, а также при наличии большого количества углов или недоступных частей бетон должен иметь высокую удобоукладываемость, чтобы обеспечить полное уплотнение. Аналогичные сложности возникают при бетонировании участков с высоким процентом армирования, затрудняющим укладку и уплотнение. Так как эти особенности конструкции определяются при ее проектировании, инженер, проектирующий состав бетона, имеет ограниченный выбор. С другой стороны, если нет таких ограничений, удобоукладываемость может выбираться в широких пределах, но должен быть определен способ уплотнения. Важно, чтобы принятый способ уплотнения не изменялся в течение возведения всей конструкции. При выборе удобоукладываемости бетонной смеси для различных типов конструкции следует руководствоваться данными табл. 4.2 и 10.6.

С удобоукладываемостью бетонной смеси тесно связана связующая способность. Она зависит от количества мелкого заполнителя в смеси. Особенно в тощих смесях следует обращать внимание на мелкие фракции заполнителя. Обычно приходится делать несколько пробных замесов с разным соотношением мелкого и крупного заполнителя, чтобы подобрать состав с адекватной связующей способностью. Любая бетонная смесь должна обладать связностью, чтобы можно было получить однородный и хорошо уплотненный бетон, но важность этого свойства в различных условиях различна. Например, если бетонная смесь перевозится на большое расстояние и подается по желобам или должна заполнить армированные участки, особенно в недоступных углах, нужно, чтобы

Таблица 10.5. Максимально допустимые водоцементные отношения для различных типов конструкций и условий эксплуатации по стандарту США (ACJ Standart 613—54)

Тип конструкции	Условия эксплуатации*					
	резкое изменение температуры, замораживание и оттаивание (только бетон с воздуховлекающими добавками)			умеренная температура ниже точки замерзания, дождь или засуха		
	на воздухе	в зоне переменного уровня воды		на воздухе	в зоне переменного уровня воды	
		в чистой воде	в морской воде или при действии сульфатов**		в чистой воде	в морской воде или при действии сульфатов
Тонкостенные элементы: ограждения, бордюрные камни, подоконные доски, железобетонные сваи, трубы и все элементы с защитным слоем бетона у арматуры менее 2,5 см	0,49	0,44	0,4***	0,53	0,49	0,40***
Средние элементы: подпорные стенки, устои мостов, стойки, балки . . . . .	0,53	0,49	0,44***	****	0,53	0,44***
Внешние части массивных конструкций . . . . .	0,58	0,49	0,44***	****	0,53	0,44***
Бетонные конструкции, уложенные под водой с помощью вертикально перемещающейся трубы . . . . .	—	0,44	0,44	—	0,44	0,44
Бетонные плиты, укладываемые на землю . . . . .	0,53	—	—	****	—	—
Бетонные конструкции, защищенные от атмосферных воздействий, внутренние части зданий, подземные бетонные конструкции . . . . .	****	—	—	****	—	—
Бетонные конструкции, которые будут позднее защищены облицовкой или обратной засыпкой, но до этого должны в течение нескольких лет подвергаться замораживанию и оттаиванию . . . . .	0,53	—	—	****	—	—

\* Бетон с воздуховлекающими добавками рекомендуется применять в суровых условиях эксплуатации, а также в умеренных условиях для повышения удобоукладываемости смеси.

\*\* Растворы или грунтовые воды, содержащие сульфаты концентрацией более 0,2%.

\*\*\* При применении сульфатостойкого цемента максимальное В/Ц может быть увеличено на 0,04.

\*\*\*\* Водоцементное отношение выбирают исходя из требований прочности и удобоукладываемости.



**Таблица 10.6. Величины коэффициента уплотнения для различных условий укладки бетона с максимальным размером заполнителя 0,95 см**

Условия укладки	Степень удобоукладываемости	Коэффициент уплотнения	Осадка конуса в см
Участки, требующие особенно интенсивной вибрации, возможно с пригрузом	Особенно низкая	0,65	0
Участки, требующие интенсивной вибрации	Очень низкая	0,75	0—0,32
Армированные участки с вибрацией	Низкая	0,83	0,32—0,63
Армированные участки без вибрации и участки с большим процентом армирования с вибрацией	Средняя	0,9	0,63—2,5
Густо армированные участки (обычно не поддающиеся вибрированию)	Высокая	0,95	2,5—10,2

бетонная смесь была связной. В случаях, когда расслоение бетонной смеси невозможно, связность не так важна, однако легко расслаиваемые смеси вообще не должны применяться.

#### **МАКСИМАЛЬНАЯ КРУПНОСТЬ ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

В армированном бетоне максимально допускаемая крупность заполнителя определяется сечением бетонируемого участка и расстоянием между арматурой. С этой оговоркой обычно стараются применять заполнители с возможно большим максимальным размером зерен. Правда, в последнее время получены данные, что при повышении максимальной крупности заполнителя более чем до 3,8 см улучшения свойств бетона не наблюдается, поэтому применение заполнителя с большим максимальным размером зерен нецелесообразно. Кроме того, заполнители максимального размера требуют расширения складов и усложняют процесс приготовления бетонной смеси. Это неэкономично при малом объеме работ, но при необходимости укладки большого количества бетона повышение стоимости переработки может быть возмещено уменьшением содержания цемента в бетонной смеси.

Выбор максимального размера заполнителя определяется также наличием материала и его ценой. Например, при доставке из карьера заполнителей различного размера обычно стараются не браковать наиболее крупный заполнитель, если это возможно по техническим соображениям.

#### **ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ВИД ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

Большинство замечаний предыдущих параграфов относится кучету гранулометрического состава заполнителей, так как часто экономичнее использовать имеющийся поблизости материал, даже если это требует

применения более жирных смесей (при условии приготовления бетонной смеси без расслоения), чем возить издалека заполнитель лучшего гранулометрического состава.

Многokrратно подчеркивалось также, что не существует идеального гранулометрического состава и что можно приготовить прекрасный бетон на заполнителях с широким диапазоном гранулометрического состава.

Гранулометрический состав заполнителей влияет на состав смеси при заданных удобообрабатываемости и водоцементном отношении: чем крупнее заполнитель, тем более тощую смесь можно применить, но следует помнить, что в очень тощих смесях не будет связности без достаточного расхода мелкого заполнителя.

Можно изменить направление выбора. Если установлено отношение цемент:заполнитель, крупность заполнителя можно выбрать так, чтобы приготовить бетон с заданным соотношением вода:цемент:заполнитель и удовлетворительной удобообрабатываемостью. Очевидно, что имеются ограничения, за пределами которых невозможно приготовить хороший бетон.

Следует также учитывать влияние вида заполнителя, так как структура его поверхности, форма и другие свойства оказывают значительное влияние на отношение заполнитель:цемент при данных удобообрабатываемости и водоцементном отношении. При проектировании состава бетона важно знать, какой вид заполнителя предпочтительнее.

Важным показателем является однородность гранулометрического состава заполнителя. При крупном заполнителе достичь этого сравнительно легко, используя отдельные склады для каждой фракции. Труднее достичь однородности состава мелких заполнителей, а это особенно важно, если содержание воды в бетонной смеси контролируется оператором бетономешалки по постоянной удобообрабатываемости: внезапное изменение гранулометрического состава мелкого заполнителя требует для сохранения удобообрабатываемости добавления воды, и это вызывает снижение прочности бетона. Таким образом, важно, чтобы гранулометрический состав заполнителей менялся от замеса к замесу в допустимых пределах.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Процедура пробных замесов и последующих корректировок при всех методах проектирования состава бетона кажется эмпирической и производит впечатление ненаучной, но колебания свойств цемента и заполнителя таковы, что наши расчеты лишь приблизительны. Но чем больше наши знания о различных свойствах ингредиентов бетонной смеси, тем ближе к истине наши расчеты. При таких знаниях и опыте можно проектировать бетонную смесь, хотя этот процесс никогда не будет автоматическим. Это искусство и наука одновременно. Если читатель не может запроектировать «удовлетворительный» бетон, ему следует подумать о выполнении конструкции из стали.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ I**

### **БРИТАНСКИЕ СТАНДАРТЫ**

---

#### **А. Цемент**

- BS 12 : 1958. Портландцемент (обычный и быстротвердеющий).
- BS 146 : 1958. Шлакопортландцемент.
- BS 1370 : 1958. Низкотермичный портландцемент.
- BS 915 : 1947. Глиноземистый цемент.
- BS 1014 : 1961. Пигменты для цемента и бетона.

#### **В. Заполнители**

- BS 882 : 1954. Заполнители для бетона из естественных пород.
- BS 812 : 1960. Методы отбора проб и испытаний минеральных заполнителей, песков и порошков.
- BS 877 : 1939. Вспученный доменный шлак — заполнитель для бетона.
- BS 1047 : 1952. Крупный заполнитель для бетона из воздушноохлажденного доменного шлака.
- BS 1165 : 1957. Топливный (котельный) шлак — заполнитель для неармированного бетона и бетона заводского изготовления.
- BS 410 : 1962. Испытательные сита.

#### **С. Бетон**

- BS 2787 : 1956. Терминология для бетона и железобетона
- BS 1881 : 1952. Методы испытания бетона.
- BS 3148 : 1959. Испытания воды для приготовления бетонной смеси.
- BS 1305 : 1959. Типы бетономешалок.
- BS 340 : 1963. Технические условия на сборные бетонные бордюрные камни и лотки.
- BS 368 : 1956. Сборные бетонные плиты.
- BS 2028 : 1953. Сборные бетонные блоки.
- BS 1926 : 1962. Товарный бетон.
- CP 114 : 1957. Применение железобетона в строительстве.
- CP 115 : 1959. Применение предварительно напряженного железобетона в строительстве.
- CP 2007 : 1960. Проектирование и возведение емкости для хранения воды и других жидкостей из железобетона и предварительно напряженного железобетона.
- CP 116 : 1965. Применение сборного железобетона (в том числе и в составных конструкциях).

## ПРИЛОЖЕНИЕ II

### СТАНДАРТЫ США (ASTM \*)

---

#### А. Цемент

- C 150—64. Технические условия на портландцемент.  
C 150—64. Технические условия на портландцемент с воздухововлекающей добавкой.  
C 205—64Т\*. Технические условия на шлакопортландцемент.  
C 340—64Т. Технические условия на пуццолановый портландцемент.  
C 358—64Т. Технические условия на бесклинкерный шлаковый цемент.  
C 114—61Т. Химические анализы портландцемента.  
C 115—58. Определение удельной поверхности портландцемента турбидиметром.  
C 204—55. Определение удельной поверхности портландцемента приборами воздухопроницаемости.  
C 188—44. Определение удельного веса гидравлического цемента.  
C 186—55. Определение тепловыделения портландцемента.  
C 187—58. Определение нормальной густоты гидравлического цемента.  
C 191—58. Определение сроков схватывания гидравлического цемента с помощью иглы Вика.  
C 266—58Т. Определение сроков схватывания гидравлического цемента иглой Гилмори.  
C 109—63. Определение прочности при сжатии цементных растворов.  
C 151—63. Определение расширения портландцемента при запаривании под давлением (автоклавного расширения).  
C 206—63Т. Определение химической стойкости растворов.  
C 452—63Т. Определение возможного расширения цементных растворов при действии сульфатов.  
C 350—64Т. Технические условия на золу-унос как добавку к портландцементным бетонам.  
C 402—63Т. Технические условия на сырую и обожженную пуццолану как добавку к портландцементному бетону.  
E 11—61. Технические условия на средства испытаний (сита из проволоочной ткани, грохоты и сита с круглыми и квадратными отверстиями).

#### В. Заполнители

- C 33—64. Технические условия на заполнители для бетона.  
C 294—56. Номенклатура природных заполнителей.  
C 295—54. Практические рекомендации для петрографических исследований заполнителей для бетона.  
C 330—64Т. Технические условия на легкие заполнители для конструктивных бетонов.  
C 331—64Т. Технические условия на легкие заполнители для бетонных строительных деталей.  
C 332—61. Технические условия на легкие заполнители для бетона, применяемого для защиты.  
C 136—63. Ситовой анализ мелкого и крупного заполнителя.  
C 117—62Т. Испытание материалов, проходящих через сито № 200, отмучиванием.  
C 127—59. Определение удельного веса и водопоглощения крупного заполнителя.  
C 128—59. Определение удельного веса и водопоглощения мелкого заполнителя.  
C 29—60. Определение объемного веса заполнителя.  
C 30—37. Определение пор в заполнителях для бетона.  
C 70—47. Определение поверхностной влажности мелкого заполнителя.  
C 40—60. Определение органических примесей в песке для бетона.  
C 142—64Т. Определение содержания глины в природных заполнителях.  
C 88—63. Определение прочности заполнителей при действии  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{MgSO}_4$ .

\* Т — означает временный стандарт.

- С 131—64Т. Определение сопротивления истираемости крупного заполнителя малого размера с помощью машин Лос-Анджелеса.
- D 2—33. Определение истираемости горных пород с помощью машины Деваля.
- D 289—63. Определение истираемости щебня с помощью машины Деваля.
- D 3—18. Определение ударной вязкости горных пород.
- С 289—64. Определение реакционной способности заполнителей (химический метод).
- С 227—64. Определение взаимодействия щелочей цемента с кремнеземом заполнителя (метод погружения стержня в цементный раствор).
- С 342—64. Определение изменения объема сочетания цемент — заполнитель.

### С. Бетон

- С 124—39. Определение расплыва бетона с помощью встряхивающего столика.
- С 143—58. Определение осадки конуса бетона.
- С 360—63. Определение пенетрации шара в бетонную смесь.
- С 403—63Т. Определение сроков схватывания бетонной смеси по сопротивлению пенетрации.
- С 232—58. Определение водоотделения бетонной смеси.
- С 138—63. Определение объемного веса, пластичности и содержания воздуха (гравиметрическим методом) в бетонной смеси.
- С 173—58. Определение содержания воздуха в бетонной смеси волюметрическим методом.
- С 231—62. Определение содержания воздуха в бетонной смеси методом давления.
- С 470—61Т. Определение прочности бетона при сжатии на образцах-цилиндрах диаметром 6—12 дюймов, приготовленных в формах однократного использования.
- С 39—64. Определение прочности при сжатии отформованных бетонных цилиндров.
- С 31—62Т. Приготовление и хранение образцов для испытания на сжатие и изгиб в полевых условиях.
- С 116—60Т. Испытания бетона на сжатие с использованием половинок образцов после испытаний на изгиб (модифицированный метод кубов).
- С 192—62Т. Приготовление и хранение бетонных образцов для лабораторных испытаний на сжатие и изгиб.
- С 78—64. Определение прочности бетона при изгибе (балочки с нагрузкой, приложенной в трех точках).
- С 293—64. Определение прочности бетона при изгибе (балочки с нагрузкой, приложенной в центральной точке).
- С 469—63. Определение статического модуля упругости и коэффициента Пуассона при сжатии цилиндрических бетонных образцов.
- С 418—64. Определение сопротивления бетона истиранию.
- С 158—64Т. Определение линейных деформаций цементного раствора и бетона.
- С 85—64. Определение содержания цемента в затвердевшем бетоне на портландцементе.
- С 260—63Т. Технические условия на воздухоовлекающие добавки к бетону.
- С 457—60Т. Практические рекомендации по микроскопическому определению содержания воздушных пор, удельной поверхности и расстояния между порами в затвердевшем бетоне.
- С 290—63Т. Определение сопротивления бетонных образцов быстрому замораживанию и оттаиванию в воде.
- С 291—61Т. Определение сопротивления бетонных образцов быстрому замораживанию на воздухе и оттаиванию в воде.
- С 292—63Т. Определение сопротивления бетонных образцов медленному замораживанию и оттаиванию в воде или рассоле.
- С 310—61Т. Определение сопротивления бетонных образцов медленному замораживанию на воздухе и оттаиванию в воде.
- С 94—64. Технические условия на товарный бетон.

1. Ф. М. Иванов. Московский цемент — предшественник портландцемента. «Цемент», 1949, № 1.
2. В. Н. Юнг. Основы технологии вяжущих веществ. Промстройиздат, М., 1951.
3. И. Л. Значко-Яворский. Очерки истории вяжущих веществ от древнейших времен до середины XIX века. Изд. АН СССР, М.—Л., 1963.
4. В. Н. Юнг и др. Технология вяжущих веществ. Стройиздат, М., 1952.
5. В. А. Кинд. Специальные цементы, М.—Л, Гос. научн.-техн. изд., 1932.
6. Н. А. Торопов. Химия цемента. Промстройиздат, 1956.
7. Ю. М. Бутт. Практикум по технологии вяжущих веществ и изделий из них. Госстройиздат, 1953.
8. В. С. Горшков, В. В. Тимашев. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. «Высшая школа», М., 1963.
9. Л. С. Зевин, Д. М. Хейкер. Рентгеновские методы исследования строительных материалов. Стройиздат, М., 1965.
10. В. С. Горшков. Термография строительных материалов. Стройиздат, М., 1968.
11. А. Е. Шейкин. Прочность цементного камня. ЛИИЖТ, Л., 1940.
12. С. В. Шестоперов. Долговечность бетона. Автотрансиздат, М., 1955, 1960, 1965.
13. П. А. Ребиндер, Е. Е. Сегалова. Новые проблемы коллоидной химии минеральных вяжущих материалов. «Природа», № 12, 1952.
14. Е. Е. Сегалова. Физико-химические исследования процессов твердения минеральных вяжущих веществ. Изд. МГУ, 1964.
15. Н. В. Михайлов, Е. Е. Калмыкова. Заводская лаборатория, № 8, 924, 1953.
16. Н. В. Михайлов, П. А. Ребиндер. Основные положения физико-химической теории бетона и предложения по технологии бетона на основе выводов из теории НТО пром. строительных материалов. Промстройиздат, 1956.
17. В. Б. Ратинов, А. П. Лавут. Вывод уравнений кинетики гидратации при твердении вяжущих веществ. Сб. трудов НИИЖелезобетона, вып. 6. Госстройиздат, М., 1962.
18. В. Б. Ратинов, А. П. Лавут. Исследование кинетики гидратации минералов портландцементного клинкера. ДАН СССР т. 146, № 1, 1962, стр. 151—155.
19. А. А. Байков. Собрание трудов, т. 5. Изд. АН СССР, М., 1948.
20. В. Журавлев. Химия вяжущих веществ. Госхимиздат, 1951.
21. Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. Влияние фазового состава портландцементных клинкеров на вяжущие свойства цементов. В кн. «Труды ВНИИ цементной промышленности», вып. 17. Госстройиздат, 1962.
22. Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. Портландцементный клинкер. Стройиздат, 1967.
23. С. Д. Окороков. Взаимодействие минералов портландцементного клинкера в процессе твердения цемента. Стройиздат, М.—Л., 1945.
24. С. Д. Окороков. К вопросу о механизме «коллоидации» по А. А. Байкову при твердении вяжущих веществ. Труды совещания по химии цемента. Промстройиздат, 1956.
25. А. Ф. Полак. Твердение мономинеральных вяжущих веществ. Стройиздат, М., 1966.
26. П. А. Ребиндер. Физико-химические представления о механизме схватывания и твердения минеральных вяжущих веществ. Труды совещания по химии цемента. Промстройиздат, М., 1956.
27. Е. Е. Сегалова, П. А. Ребиндер. Современные физико-химические представления о процессах твердения минеральных вяжущих веществ. «Строительные материалы», 1960, № 1.
28. В. Б. Ратинов, А. Е. Шейкин. Современные воззрения на процессы гидратации вяжущих веществ. Доклад совещания по проблемам технологии сборного железобетона. Стройиздат, М., 1966.

29. М. Ф. Казанский. ДАН СССР, 130, № 5, 1960. М. Ф. Казанский, Ф. Ф. Луцки, М. В. Казанский. ИФЖ, т. 11, № 5, 1966.
30. О. П. Мчедлов-Петросян. Новое в химии и технологии цемента. Труды совещания по химии и технологии цемента. Госстройиздат, М., 1962.
31. М. И. Хигерович. Гидрофобный цемент. Промстройиздат, М., 1957.
32. В. В. Михайлов, Б. Г. Скрамтаев, Э. З. Юдович. «Цемент», 1946, № 6.
33. В. В. Михайлов, Э. З. Юдович, А. Н. Попов. Водонепроницаемый расширяющийся цемент и его применение в строительстве. Сб. статей. Госстройиздат, 1951.
34. К. Д. Некрасов. Жароупорный бетон. Промстройиздат, 1957.
35. С. Н. Алексеев. Коррозия и защита арматуры в бетоне. Стройиздат, М., 1968.
36. Г. А. Бужевич. Легкие бетоны на пористых заполнителях. Стройиздат, М., 1970.
37. В. М. Москвин, Г. С. Рояк. Коррозия бетона при действии щелочей цемента на кремнезем заполнителей. Госстройиздат, 1962.
38. А. Е. Десов. Вибрированный бетон. Стройиздат, 1956.
39. С. В. Шестоперов, А. Н. Защепин. Новые исследования в области цементного бетона. Дориздат, М., 1949.
40. О. Я. Берг. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. Госстройиздат, 1961.
41. О. Я. Берг. Некоторые вопросы теории деформации и прочности бетона. «Строительство и архитектура», 1967, № 10.
42. G. N. Pissanko. Untersuchung des Zerstörungsprocesses von hochfestem Beton unter Belastung: «Wissenschaftliche Zeitschrift der TU.» Dresden, 1968, 17, H.6
43. Г. Н. Писанко. Сопrotивление высокопрочных бетонов растяжению. «Бетон и железобетон», 1970, № 3.
44. С. А. Миронов, Л. А. Малинина. Ускорение твердения бетона. Стройиздат, М., 1964.
45. С. А. Миронов, О. С. Иванова. «Промышленное строительство, 1967, № 2; «Гидротехническое строительство, 1967, № 4.
46. С. А. Миронов. Температурный фактор в твердении бетона. Стройиздат, 1948.
47. Ф. М. Иванов. Об использовании эффекта набухания бетона. «Бетон и железобетон», 1957, № 4.
48. С. В. Александровский. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести). Стройиздат, М., 1966.
49. В. М. Москвин. Коррозия бетона. Госстройиздат, М., 1952.
50. Указания по антикоррозионной защите строительных конструкций. Нормы проектирования (СН 262—67).
51. С. А. Миронов. Теория и методы зимнего бетонирования. Госстройиздат, М., 1958.
52. А. В. Лыков. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. Гостехтеоретиздат, М., 1954.
53. В. В. Стольников. Воздухововлекающие добавки в гидротехническом бетоне. Госэнергоиздат, 1953.
54. Ф. М. Иванов. Бетон для Кислогубской приливной электростанции. Сб. «Энергетическое строительство», № 4, с. 52. «Энергия», М., 1967.
55. Э. А. Виноградова. Бетоны высокой морозостойкости. «Бетон и железобетон», 1967, № 10.
56. В. Г. Батраков. Повышение долговечности бетона добавками кремний-органических полимеров. Стройиздат, М., 1968.
57. К. Д. Некрасов, А. П. Тарасова. Жаростойкий бетон на портландцементе. Стройиздат, М., 1969.
58. Б. Г. Скрамтаев. Крупнопористый бетон и его применение в строительстве. Госстройиздат, 1955.

59. Б. Г. Скрамтаев, П. Ф. Шубенкин, Ю. М. Баженов. Способы определения состава бетона различных видов. Стройиздат, М., 1966.

60. Инструкция по расчету состава и контролю прочности высокомарочных бетонов. Изд. 2-е, Стройиздат, М., 1968.

61. Рекомендации по определению составов обычного тяжелого бетона и снижению расхода цемента. Изд. НИИСП Госстроя УССР, Киев, 1970.

62. Справочник инженера-строителя, изд. 3-е, том 2, полутом 2, гл. IX. «Бетонные работы». Стройиздат, М., 1970.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие . . . . .	3
Глава 1. Портландцемент . . . . .	5
Глава 2. Специальные цементы . . . . .	37
Глава 3. Свойства заполнителей . . . . .	67
Глава 4. Бетонная смесь . . . . .	127
Глава 5. Прочность бетона . . . . .	161
Глава 6. Упругость, усадка и ползучесть . . . . .	199
Глава 7. Долговечность бетона . . . . .	232
Глава 8. Испытание затвердевшего бетона . . . . .	269
Глава 9. Легкие и особоотяжелые бетоны . . . . .	308
Глава 10. Проектирование состава бетона . . . . .	325
Приложение I. Британские стандарты . . . . .	339
Приложение II. Стандарты США . . . . .	340
Литература . . . . .	342

А. М. НЕВИЛЛЬ

### СВОЙСТВА БЕТОНА

(перевод с англ.)

Научный редактор д-р техн. наук Иванов Ф. М.

\* \* \*

*Стройиздат*  
Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 9

\* \* \*

Редактор издательства Николаева Н. М.  
Внешнее оформление художника Семина В. А.  
Технический редактор Мочалина З. С.  
Корректор Кудрявцева Е. Н.

---

Сдано в набор 9/III 1972 г. Подписано к печати 19/V 1972 г. Бумага 70×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>—10,75 бум. л  
25,15 усл. печ. л. (уч.-изд. 25,91 л.) Изд. № VIII—2122. Зак. № 219. Цена 2 р.

---

Владимирская типография Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР  
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 186.



