

**А.Г. Зоткин**

# **БЕТОНЫ** **с эффективными** **добавками**

УДК 666.031  
ББК 38.626.1  
З 88

Зоткин А.Г.  
3 88 Бетоны с эффективными добавками. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 160 с.

ISBN 978-5-9729-0079-4

Рассматривается применение суперпластификаторов, минеральных и воздухововлекающих добавок в бетонах, принципы их использования, свойства бетонных смесей и бетонов с этими добавками.

Выделена рациональная область применения суперпластификаторов и минеральных добавок. Рассматриваются характеристики этих групп добавок и механизмы их действия, эффекты в бетонах разных составов, совместимость добавок с цементами. Приведены и обобщены литературные данные по этим вопросам. Предлагаются методики определения оптимальных расходов добавок и назначения составов бетонов.

Разделы, посвященные бетонам с добавками, предваряются изложением основных свойств и зависимостей для бездобавочного (классического) бетона, используемых при дальнейшем рассмотрении бетонов с добавками.

Издание ориентировано в первую очередь на инженерно-технический персонал, занимающийся производством бетона и конструкций из него, а в определенной части – и на научных работников. Оно может быть полезно студентам и аспирантам строительного направления.

© Зоткин А.Г., автор, 2014  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2014

ISBN 978-5-9729-0079-4

# 1. КЛАССИЧЕСКИЙ БЕТОН

**Тяжелый (обычный) бетон** – двухкомпонентный материал, состоящий из плотных заполнителей и пористого цементного камня. История бетона насчитывает несколько тысяч лет, и в отличие от современного бетона с добавками его можно назвать классическим.

Бетон получают в результате затвердевания бетонной смеси, состоящей из заполнителей, цемента и воды. Последние два компонента образуют цементное тесто, которое придает бетонной смеси пластические свойства, а также обеспечивает ее твердение, трансформируясь в цементный камень. Объем цементного камня в бетоне составляет обычно  $250 - 350 \text{ л/м}^3$ , объем заполнителей – соответственно  $750 - 650 \text{ л/м}^3$ .

Количество воды назначается из условия подвижности бетонной смеси. Оно составляет обычно  $40 - 70\%$  от массы цемента и является значительно большим, чем требуется для химических реакций с цементом (примерно  $15\%$ ). Избыточная вода остается в свободном состоянии и образует в цементном камне значительное количество пор.

Компоненты затвердевшего бетона неравноценны. Слабейшим из них является пористый цементный камень, который и определяет свойства бетона. Заполнители также оказывают на них определенное влияние, но при достаточном качестве (соответствии стандартам) их роль гораздо менее значительна, чем цементного камня. Так, при прочности обычных заполнителей  $80 - 120 \text{ МПа}$  и более (кварцевый песок – порядка  $1000 \text{ МПа}$ ) прочность обычных бетонов составляет  $20 - 50 \text{ МПа}$ . Она определяется прочностью цементного камня.

## 1.1. Материалы для бетона

### 1.1.1. Портландцемент

Портландцемент является основным видом вяжущего, применяемым для бетона. Его получают обжигом смеси глины и известняка, в результате чего образуются искусственные минералы, слагающие продукт обжига – *клинкер*. Для получения портландцемента его размалывают с добавлением *гипсового камня*, а часто и *активных минеральных добавок*.

Портландцемент состоит в основном из клинкерных минералов. Это:

- трехкальциевый силикат (алит)  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ );
  - двухкальциевый силикат (белит)  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ );
  - трехкальциевый алюминат (алюминат)  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ );
  - четырехкальциевый алюмоферрит (алюмоферрит)  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_4\text{AF}$ ).
- В скобках приведены сокращенные названия и обозначения минералов.

Основным является алит (содержание до  $60 - 65\%$ ), остальные минералы содержатся в значительно меньших количествах. Содержание силикатов составляет в среднем примерно  $75\%$ , поэтому были предложения называть портландцемент силикатным цементом.

Зерна цемента имеют размеры от  $1$  до  $100 \text{ мкм}$ , преимущественно  $5 - 40 \text{ мкм}$ . Его тонкость помола принято характеризовать удельной поверхностью зерен. Она

колеблется от примерно 3000 см<sup>2</sup>/г для обычных цементов до 4000 – 4500 см<sup>2</sup>/г для тонкомолотых цементов с высокой прочностью. На всей этой поверхности, достигающей почти 0,5 м<sup>2</sup>/г цемента, при твердении происходят реакции между минералами цемента и водой.

В нашей стране действуют два стандарта на портландцемент: старый, предусматривающий деление цемента на *марки* [9], и новый, использующий *классы* цемента [14]. Производители цемента сами определяют, по какому стандарту выпускать его. Сегодня большинство из них производят портландцемент по ГОСТ 31108.

В отличие от марки цемента, определяемой в цементно-песчаном растворе состава 1 : 3 при В/Ц = 0,4 на однофракционном песке, класс цемента определяется на растворе того же состава, но при В/Ц = 0,5 и при использовании полифракционного песка. Образцы – балочки 4x4x16 мм твердеют после распалубки в воде при 20<sup>0</sup>С и испытываются в 28-дневном возрасте. Получаемая при этом прочность носит название *активности цемента*, по ней устанавливается марка или класс. Стандарты предусматривают марки портландцемента 400, 500, 550 и 600 (численные значения соответствуют гарантированной прочности в кгс/см<sup>2</sup>) и классы 32,5; 42,5 и 52,5 (прочность – в МПа).

В связи с различными методиками испытаний установить однозначную связь между этими показателями не представляется возможным. Ориентировочно можно считать, что класс 32,5 примерно соответствует марке 400, 42,5 – марке 500 и 52,5 – марке 600.

ГОСТ 31108 нормирует также прочность цемента в 2-дневном возрасте, причем на достаточно высоком уровне. По ее величине цементы делятся на нормальноотвердеющие (Н) и быстротвердеющие (Б). Так, ЦЕМ 42,5Н должен иметь 2-дневную прочность  $\geq 10$  МПа, ЦЕМ 42,5Б  $\geq 20$  МПа, ЦЕМ 52,5 Б  $\geq 30$  МПа.

*По вещественному составу* цементы подразделяются на клинкерные и с минеральными добавками, соответственно называемые портландцемент и портландцемент с активной минеральной добавкой (при ее содержании до 20%). При большом содержании минеральной добавки получают пуццолановый портландцемент, а доменного гранулированного шлака – шлакопортландцемент.

По ГОСТ 31108 классификация цементов по вещественному составу более детализирована. Выделено пять групп цементов:

ЦЕМ I – портландцемент;

ЦЕМ II – портландцемент с минеральными добавками (пуццолана, зола-уноса, микрокремнезем, шлак и др. – до 20%). Обозначение: группа А (например, ЦЕМ II/А-З: с золой уноса; ЦЕМ II/А-Ш: со шлаком). Предусмотрена и добавка шлака 21 – 35% (ЦЕМ II/В-Ш);

ЦЕМ III – шлакопортландцемент (36 – 65% шлака);

ЦЕМ IV – пуццолановый портландцемент (21 – 35% минеральной добавки);

ЦЕМ V – композиционный цемент (включает две добавки: шлак + зола-унос; каждой до 30%).

Стандартными свойствами цемента являются также *нормальная плотность цементного теста* (количество воды, необходимое для получения теста определенной пластичности), *сроки схватывания* (начало схватывания цемента определяет время жизни бетонной смеси), а также *равномерность изменения объема цемента при твердении*.

### 1.1.2. Заполнители

Заполнители делятся на крупный - гравий или щебень с размерами 5 – 70 (80) мм и мелкий – песок с размерами зерен 0,16 – 5 мм.

Основные свойства заполнителей, нормированные стандартом [13]: прочность, крупность и зерновой состав, допустимое содержание примесей.

**Прочность заполнителей** должна в 1,5 – 2 раза превышать прочность бетона. Так как цементный камень является самым дорогим компонентом бетона, его прочность нужно использовать полностью (бетон должен разрушаться по цементному камню), что и достигается при повышенной прочности заполнителей. Кроме того, заполнители высокой прочности оказывают упрочняющее действие на цементный камень, что дает повышение прочности бетона до 20%.

**Требования к зерновому составу и крупности заполнителей** определяются стремлением иметь минимальный расход цемента в бетоне. Поэтому пустотность заполнителей, заполняемая цементным тестом, и их поверхность, смазываемая им, должны быть минимальными. Следует отметить, что эти требования противоречат одно другому: если все зерна будут крупными (что дает минимальную поверхность заполнителей), между ними будет много пустот, а при заполнении их все более мелкими зёрнами увеличивается поверхность заполнителей. Поэтому приходится принимать компромиссное решение: заполнители должны быть по возможности крупными, но при этом содержать и достаточное количество зерен более мелких размеров для заполнения пустот.

Крупный заполнитель характеризуется *наибольшей крупностью (НК)*. Она может составлять 10, 20, 40 и 70 (80) мм и выбирается в зависимости от размеров конструкции. Для получения минимальной пустотности предусмотрено применение фракционированного заполнителя, в виде фракций 5 – 10, 10 - 20, 20 – 40, 40 – 70 мм. При выбранной НК заполнителя фракции нужных размеров смешиваются в оптимальном соотношении, указанном в стандарте [13].

Крупность песка характеризуется *модулем крупности (Мк)*. Так как предельные размеры песка фиксированы (0,16 – 5 мм), модуль крупности рассчитывается по содержанию зерен разных размеров. Чем крупнее фракция песка, тем с большим коэффициентом она учитывается при расчете Мк. Поэтому чем он больше, тем выше содержание в песке зерен крупных размеров.

По стандарту Мк песка должен быть в пределах от 2 до 3,25 (учитывая имеющуюся сырьевую базу, допускается применение песков с Мк = 1,5-2). При большей крупности песка возрастает его пустотность, при меньшей – существенно увеличивается удельная поверхность. В обоих случаях увеличивается расход цемента в бетоне.

**Примеси.** В заполнителях могут присутствовать различные вредные примеси. Это пылеватые и глинистые, органические примеси, различные химические соединения: аморфный кремнезем, сернистые и сернокислые соединения, ионы хлора и др. Пылеватые и глинистые примеси повышают водопотребность бетонной смеси, органические могут замедлять твердение цемента, другие примеси могут вызывать коррозию бетона и арматуры в нем. Поэтому их допустимое содержание нормируется стандартом [13].

Применение заполнителей повышенного качества: прочных, чистых (промытых), имеющих оптимальный зерновой состав (фракционированных) позволяет не только снизить расход цемента в бетоне, но и существенно повысить его качество.

## 1.2. Бетонная смесь

Бетонная смесь образуется при смешивании цемента, воды, песка и крупного заполнителя. Это промежуточное (технологическое) состояние бетона со «временем жизни» не более 1 – 2 ч, но состав и свойства бетонной смеси в основном определяют качество получаемого бетона (дополнительное влияние оказывают условия твердения).

Бетонная смесь является сложной трехфазной системой, включающей твердые частицы (заполнители и цемент), жидкую фазу: воду и растворенные в ней вещества, а также некоторое количество воздуха. Он «зашемляется» в пустотах твердых частиц в процессе образования смеси, а также дополнительно вовлекается при перемешивании.

Вода в бетонной смеси находится в основном в свободном состоянии, но некоторая часть ее *адсорбируется* на поверхностях цемента, заполнителей и возникающих при реакциях цемента с водой продуктах его гидратации.

*Адсорбцией* называется повышение концентрации вещества на поверхности раздела фаз по сравнению с его содержанием в объеме. Для бетонной смеси наибольшее значение имеет адсорбция воды на поверхности твердых частиц. Она объясняется тем, что на поверхностях твердых тел действуют силы межмолекулярного притяжения. Расстояние их действия очень мало – распространяется на несколько слоев молекул, – но величина весьма значительна. Поэтому твердые поверхности притягивают к себе различные молекулы, а также сверхмелкие частицы, например, высокодисперсную пыль.

Если твердая частица находится в воде, концентрация молекул воды на ее поверхности повышается. Хотя вода практически несжимаема, действующие силы настолько велики, что ее молекулы притягиваются к поверхности твердых частиц и «упаковываются» более плотно.

Особенно сильно уплотненными являются первые два – три слоя молекул воды. Они переходят в остеклованное («псевдотвердое») состояние. Плотность воды в этих слоях возрастает до полутора раз. Она приобретает упругость и некоторую прочность, температура ее замерзания становится ниже  $-70^{\circ}\text{C}$ . Последующие слои воды по мере удаления от твердой поверхности изменяют свои свойства все в меньшей степени. Общее количество таких «рыхлосвязанных» слоев воды достигает 30 – 40.

«Оболочки» из адсорбированной воды вокруг твердых частиц контактируют между собой, создавая пространственную структуру. Благодаря ей, бетонная смесь приобретает внутреннюю связность, а твердые частицы разных размеров удерживаются равномерно распределенными в ней.

Роль частиц в создании связности бетонной смеси возрастает при уменьшении их размеров, т.к. мелкие частицы имеют большую поверхность и адсорбируют повышенное количество воды. Решающее значение имеют зерна цемента и особенно продукты их гидратации, адсорбирующие наибольшее количество воды, опреде-

ленное влияние оказывают мелкие фракции песка. В то же время рост водосодержания разоблачает частицы и уменьшает степень связности бетонной смеси. Это может приводить к оседанию твердых частиц под действием сил тяжести и перемещению воды в верхние слои бетонной смеси (т.е. расслоению).

С момента образования бетонной смеси начинаются реакции минералов цемента с водой. Вода связывается химически, но еще большее ее количество адсорбируется на непрерывно образующихся микрочастицах – продуктах гидратации цемента. Это и приводит к постепенному загустеванию смеси. В то же время до момента формирования бетонная смесь должна обладать необходимой удобоукладываемостью.

В итоге основными свойствами бетонной смеси являются:

- удобоукладываемость;
- нерасслаиваемость;
- сохраняемость удобоукладываемости.

### 1.2.1. Удобоукладываемость бетонной смеси

Удобоукладываемость является важнейшей характеристикой бетонной смеси. Ее можно определить как способность смеси под действием силы тяжести (собственной массы) или внешних воздействий (например, вибрации) растекаться и принимать заданную форму. Одновременно бетонная смесь должна уплотняться, выделяя часть содержавшегося в ней воздуха, и при этом сохранять однородность: равномерное распределение компонентов в объеме смеси.

По удобоукладываемости бетонные смеси делятся на подвижные и жесткие. Определение вида смеси и ее подвижности производится при помощи стандартного конуса [11]. Он заполняется бетонной смесью (с уплотнением), а затем снимается. Если смесь при этом сохраняет форму, она является жесткой, а если деформируется (оседает), то подвижной (рис. 1.1).



Рис 1.1. Определение вида и подвижности бетонной смеси при помощи стандартного конуса [3]

Жесткие бетонные смеси содержат меньше воды и соответственно цемента. Но для них требуется высокая интенсивность уплотнения (виброплощадки, вибропрессование и т.д.). Сегодня в большинстве случаев применяются более легкоукладываемые подвижные смеси.

Мерой подвижности бетонной смеси является величина осадки конуса (ОК). Подвижные смеси делятся на пять марок (табл. 1.1).

Таблица 1.1

**Марки бетонной смеси по подвижности [7]**

Марка по подвижности	Подвижность, см	
	осадка конуса	распływ конуса
П1	1-4	-
П2	5-9	-
П3	10-15	-
П4	16-20	26-30
П5	21 и более	31 и более

Для высокоподвижных и литых смесей с ОК > 16 - 20 см предусмотрено также определение расплыва конуса (растекаемости смеси). Он лучше характеризует формовочные свойства литых смесей и особенно самоуплотняющихся бетонов.

Для оценки жесткости бетонной смеси применяют вибрацию, причем известно несколько методов [1,2]. Стандартным является показатель жесткости по Вебе: время, необходимое для растекания конуса вибрируемой смеси в приборе Вебе, представляющем собой цилиндр с пригрузочным диском [11].

Независимо от подвижности или жесткости удобоукладываемая бетонная смесь должна быть пластичной.

**Пластичность** – способность смеси деформироваться без нарушений слитности (образования разрывов и трещин) и разделения на составляющие. Благодаря этому бетонная смесь принимает при формировании требуемую форму, сохраняя при этом однородность и слитность строения.

Пластичность бетонной смеси обеспечивается при правильном назначении состава бетона и достаточном содержании в ней дисперсных частиц (цемент, тонкие фракции песка, минеральные добавки).

Еще одной характеристикой бетонной смеси является **миксотропность**. Это способность бетонной смеси при механических воздействиях (например, вибрации) разжижаться, а после их прекращения вновь восстанавливать вязкость. Твердые частицы смеси при вибрации приходят в колебания, с большой частотой смещаются друг относительно друга и теряют адсорбированную воду. Переходя в свободное состояние, она разжижает бетонную смесь. После прекращения вибрации частицы вновь сорбируют воду и вязкость смеси восстанавливается.

**Влияние состава смеси на удобоукладываемость**

Важным аспектом технологии бетона является получение бетонных смесей требуемой удобоукладываемости. Оно достигается регулированием состава смеси.

*Состав смеси выражается расходами материалов, необходимыми для получения 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси.* «Модельным» является представление о бетонной смеси как частицах заполнителей, покрытых слоем цементного теста, выполняющего роль смазки. Чем толще слой смазки и ниже ее вязкость, тем выше будет подвижность бетонной смеси.



Расход воды – основной фактор, определяющий подвижность смеси. С ростом ее содержания объем теста увеличивается, а его вязкость снижается. Оба фактора способствуют повышению подвижности бетонной смеси.

Качество бетонной смеси и бетона тем выше, чем ниже расход воды при той же подвижности смеси. Поэтому еще одной характеристикой бетонной смеси является ее **водопотребность** – количество воды, обеспечивающее определенную удобоукладываемость. Она существенно зависит от применяемых заполнителей, их крупности, пустотности, чистоты, а также формы и степени шероховатости зерен. Чем ниже водопотребность бетонной смеси, тем выше – при прочих равных условиях – качество бетона.

Рост расхода цемента уже повышает вязкость цементного теста. Но при этом увеличивается и объем теста. По-видимому, эти факторы взаимно компенсируются. В итоге изменение расхода цемента от 200 до 400 кг/м<sup>3</sup> бетонной смеси не влияет на ее подвижность. Эта очень важная для практики зависимость выражается *правилом постоянства водопотребности: подвижность бетонной смеси на постоянных материалах зависит только от расхода воды.*

Благодаря этой закономерности количество воды, обеспечивающее нужную подвижность бетонной смеси, можно назначать, не зная расходов других материалов. Это упрощает подбор состава бетона.

При увеличении расхода цемента свыше 400 кг/м<sup>3</sup> (т.е. при Ц/В > 2,2 – 2,5) это правило уже не действует и водопотребность бетонной смеси возрастает. Поэтому применение в бетоне высоких расходов цемента (особенно более 450-500 кг/м<sup>3</sup>) является нежелательным.

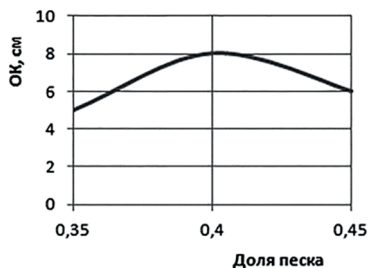
Заполнители дополняют объемы воды и цемента в бетонной смеси до 1 м<sup>3</sup>. Поэтому изменение их количества возможно либо за счет расхода воды, либо цемента с соответствующими рассмотренными выше эффектами. Но остается еще соотношение между крупным и мелким заполнителями. Оно обозначается обычно как *доля песка (r)* - его относительное содержание в смеси заполнителей:

$$r = \frac{\Pi}{\Pi + \Psi}$$

Это еще один фактор, влияющий на свойства бетонной смеси.

Песок выполняет в бетонной смеси две важных функции. Во-первых, он заполняет пустоты между зернами крупного заполнителя, причем с некоторой их раздвижкой. Это обеспечивает скольжение зерен заполнителей друг относительно друга и, следовательно, удобоукладываемость бетонной смеси. Во-вторых, количество песка должно быть достаточным, чтобы придать растворной составляющей бетонной смеси определенную вязкость, удерживающую крупный заполнитель от оседания.

При низком содержании песка превалирует положительная роль раздвижки зерен крупного заполнителя. После достижения ее оптимальных значений при дальнейшем увеличении доли песка начинает сказываться отрицательная роль роста вязкости растворной составляющей. В итоге существует оптимальная доля песка, при которой бетонная смесь имеет наибольшую подвижность при данных расходах воды и цемента (рис. 1.2).



**Рис. 1.2.** Влияние доли песка на подвижность бетонной смеси.  
Расход цемента 300 кг/м<sup>3</sup> бетона

Соотношение между мелким и крупным заполнителями влияет и на стойкость бетонной смеси к расслоению. Обычно доля песка назначается по ее наибольшей подвижности. Если сравнивать равноподвижные бетонные смеси с различной долей песка, то ее оптимальное значение обеспечивает минимальный расход цемента. Но если такая смесь отделяет воду, расход песка приходится повышать до получения нерасслаиваемой бетонной смеси, компенсируя происходящее при этом снижение подвижности некоторым увеличением расходов воды и цемента.

«Загущающее» действие на растворную составляющую оказывает не только песок, но и еще в большей степени цемент. Поэтому оптимальный расход песка снижается при увеличении количества цемента в бетоне.

На основании этих закономерностей, а также зависимости прочности бетона от В/Ц, рассмотренной далее, назначают состав бетонной смеси. Расход воды в ней составляет обычно примерно 150–200 кг/м<sup>3</sup>, цемента 200–500 кг/м<sup>3</sup>, щебня 1100–1200 кг/м<sup>3</sup>. Содержание песка уменьшается при росте количества цемента с 800 до 500 кг/м<sup>3</sup>.

### **Влияние характеристик материалов на удобоукладываемость**

Характеристики материалов, прежде всего заполнителей, оказывают большое влияние на удобоукладываемость бетонной смеси. С ростом крупности заполнителей удельная поверхность зерен снижается, толщина слоя цементного теста на них увеличивается и подвижность смеси возрастает. Определенное влияние на удобоукладываемость бетонной смеси оказывает и форма зерен заполнителей. Предпочтительны шаровидные зерна или зерна кубообразной формы. При повышении их угловатости удельная поверхность и пустотность заполнителя увеличиваются, и количество цементного теста, требуемое для сохранения удобоукладываемости бетонной смеси, возрастает. Наименее желательны зерна лещадной и пластинчатой формы. Влияет на удобоукладываемость (или водопотребность) бетонной смеси и степень шероховатости зерен. При переходе от гравия к щебню водопотребность смеси повышается.

Важное значение имеет зерновой состав заполнителей. Оптимальный зерновой состав обеспечивает минимальную пустотность. Мелкие зерна располагаются между более крупными, вытесняя цементное тесто из пустот, что увеличивает тол-

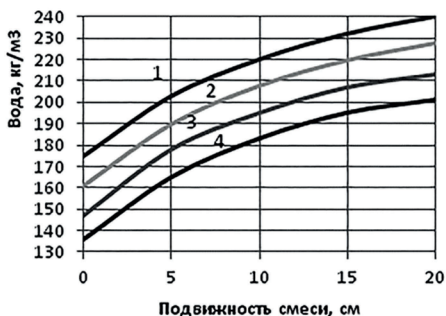
щину смазки и подвижность бетонной смеси или позволяет снизить расходы воды и цемента.

Пылевидные и глинистые частицы, содержащиеся в заполнителях, имеют очень большую удельную поверхность. Они требуют значительного количества воды для смачивания, что уменьшает подвижность бетонной смеси. Для ее сохранения потребуется больший расход воды, а для обеспечения прочности – и повышение расхода цемента.

Влияние качества цемента на подвижность бетонной смеси связано с его нормальной густотой. При ее повышении вязкость цементного теста увеличивается, а подвижность смеси уменьшается.

Действие всех факторов, снижающих подвижность бетонной смеси, на практике приходится компенсировать добавками воды. Поэтому иначе говорят, что они повышают водопотребность бетонной смеси.

**Графики водопотребности (или водосодержания)** устанавливают зависимость между удобоукладываемостью бетонной смеси и требуемым для ее получения водосодержанием. Они учитывают влияние характеристик заполнителей. Для подвижных смесей такой график представлен на рис. 1.3. Он позволяет по требуемой подвижности и характеристикам заполнителей находить ориентировочный расход воды при подборе состава бетона.



**Рис. 1.3.** Водосодержание бетонной смеси в зависимости от подвижности. Песок средней крупности и щебень с наибольшей крупностью: 1 – 10 мм; 2 – 20 мм; 3 – 40 мм; 4 – 80 мм. При применении гравия расход воды уменьшается на  $10 \text{ кг/м}^3$

### 1.2.2. Расслоение бетонной смеси

В бетонной смеси связи между компонентами являются достаточно слабыми. Поэтому твердые частицы могут под действием силы тяжести оседать, а вода вытесняться в верхние слои смеси и на ее поверхность.

Величина расслоения бетонной смеси зависит от ее подвижности. В жестких смесях оболочки адсорбированной воды вокруг твердых частиц контактируют между собой, обеспечивая связность смеси и ее однородность. Но дополнительная вода, введенная для повышения подвижности, разобьет твердые частицы. Это приводит к их оседанию и отделению воды на поверхности смеси. Процессы расслоения тем более значительны, чем выше подвижность (водосодержание) смеси.

Наибольшую скорость оседания имеют крупные заполнители. Но оно может прекратиться из-за образования в бетонной смеси «сводов» из зерен различных размеров. В то же время в растворяющей составляющей продолжается медленная седиментация мелких зерен песка и цемента.

Вода – самый легкий компонент бетонной смеси – поднимается вверх и отслаивается на ее поверхности. Отделение воды является наиболее наглядным проявлением расслоения. При этом верхний слой смеси также обогащается водой, а после затвердевания является более пористым и менее прочным. Допустимая величина водоотделения (*внешнего* расслоения) бетонной смеси нормируется ГОСТ [7].

Кроме внешнего, существует и *внутреннее* расслоение бетонной смеси. Оно включает несколько процессов. Это оседание зерен крупного заполнителя, в результате чего их содержание уменьшается в верхней и увеличивается – в нижней части отформованной бетонной смеси. Происходит также оседание частиц цемента и песка. Кроме того, нижние поверхности крупных заполнителей задерживают перемещающуюся вверх воду. Поэтому слой раствора под заполнителями имеет повышенное водосодержание и В/Ц. При более значительном расслоении вода скапливается под нижними поверхностями заполнителей, что приводит к образованию при затвердевании бетона седиментационных пор. Их ширина достигает 0,1 мм, что значительно превышает размеры капиллярных пор. Возникновение этих пор тем более вероятно, чем крупнее зерна заполнителей и выше подвижность бетонной смеси.

Расслоение замедляется, а затем и прекращается вследствие постепенного загустевания бетонной смеси.

Величина расслоения зависит от водосодержания бетонной смеси. Жесткие бетонные смеси не расслаиваются, а малоподвижные смеси мало подвержены расслоению. Для подвижных, а особенно высокоподвижных и литых смесей оно существенно усиливается. Играет роль и В/Ц смеси, определяющее вязкость цементного теста. При его уменьшении (увеличении расхода цемента) расслоение снижается при той же подвижности смеси. Наконец, повышение тонкости помола цемента приводит к его лучшей водоудерживающей способности и уменьшению расслоения бетонной смеси.

Обычным критерием расслоения является водоотделение на поверхности смеси. Для бетонных смесей с подвижностью П1 - П2 количество отделившейся воды не должно превышать 0,4%; при подвижности П3 - П5 – 0,8% от объема смеси [7].

Для уменьшения или исключения расслоения применяется ряд приемов. Простейшим из них является повышение доли песка в бетонной смеси сверх оптимальной по подвижности. Идя на некоторый перерасход цемента, получают бетоны с более однородной структурой и свойствами. Применение тонкомолотых цементов также снижает расслоение смесей. Оптимальной считается удельная поверхность порядка 4000 см<sup>2</sup>/г. Приемами, существенно уменьшающими, а иногда и полностью устраняющими расслоение бетонной смеси, является введение водопонижающих (пластифицирующих), воздухововлекающих или минеральных добавок.

### 1.2.3. Сохраняемость удобоукладываемости бетонной смеси

Удобоукладываемость бетонной смеси с течением времени постепенно снижается. Сохраняемость удобоукладываемости смеси характеризуется скоростью этого процесса. Он определяет возможное время транспортирования, а также допустимость и величину перерывов при укладке бетонной смеси.

В то же время интенсивность снижения подвижности бетонной смеси весьма различна. Это зависит от состава смеси, ее начальной консистенции, характеристик цемента, температуры смеси и т.д. Ситуация становится еще более неопределенной при введении в бетонную смесь различных добавок. Это в первую очередь широко применяемые пластификаторы, которые могут как ухудшать, так и улучшать сохраняемость бетонных смесей, а также ускорители твердения и другие добавки.

Сохраняемость удобоукладываемости бетонной смеси определяют экспериментально, фиксируя ее подвижность через определенные промежутки времени. Результат обычно выражают кривыми потери подвижности бетонной смесью (пример приведен далее, на рис. 2.4).

Используются и количественные показатели. По стандарту сохраняемость характеризуется временем, в течение которого подвижность бетонной смеси снижается на 6 см. Так, для начальной подвижности 18 см конечная осадка конуса составит 12 см. Этот критерий предполагает линейное снижение подвижности смеси во времени. В ряде случаев оно может быть и нелинейным, поэтому кривые потери подвижности смеси во времени являются, вероятно, более информативными.

Показатель сохраняемости бетонной смеси не следует воспринимать буквально (смесь пригодна для укладки в течение времени, характеризующего ее сохраняемость). Подвижность смеси при формировании должна обеспечивать ее качественное уплотнение имеющимися средствами. Поэтому целесообразно заказывать смесь с требуемой подвижностью на момент укладки. Тогда показатели сохраняемости будет использовать производитель, чтобы правильно определить начальную подвижность поставляемой бетонной смеси.

### 1.3. Твердение бетона

Твердение бетона представляет собой совокупность физических и химических процессов, протекающих при взаимодействии цемента и воды.

**Химические процессы при твердении.** С момента образования бетонной смеси на поверхности зерен цемента начинаются процессы взаимодействия с водой и ее присоединения (гидратации) минералами цемента.

Алит – основной минерал цемента, содержащийся в нем в количестве 50 – 65%. При его гидратации образуются гидросиликат и гидроксид кальция:



Эти же продукты возникают и при гидратации белита ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), но  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  выделяется в меньшем количестве. *Гидросиликат кальция*, образующийся при гидратации алита и белита, является основным минералом затвердевшего цементного камня, в наибольшей степени определяющим его технические свойства.

Количество гидроксида кальция к месячному возрасту составляет примерно 10 – 15% от массы цементного камня. Часто используется его другое название –

известь (что не совсем точно, т.к. известь – технический продукт).  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  неводостоек (его растворимость в воде  $\sim 1,2$  г/л) и имеет небольшую прочность. Он оказывает противоречивое влияние на различные свойства бетона (что будет рассмотрено ниже).

Алюминат и алюмоферрит образуют при гидратации гидроалюминат  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_3\text{AH}_6$ ) и гидроферрит кальция  $3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_3\text{FH}_6$ ). При этом алюминат, хотя и содержится в цементе в небольшом количестве (5-15%), может оказывать заметное негативное влияние на ряд свойств бетона. Он увеличивает тепловыделение, снижает морозостойкость бетона, является «виновником» сульфатной коррозии, уменьшает эффективность применения пластификаторов в бетоне. Поэтому в большом числе ситуаций целесообразно применение среднеалюминатных цементов (с содержанием  $\text{C}_3\text{A}$  до 7–8%).

*Скорость взаимодействия минералов цемента с водой* существенно различна. Буквально с первых секунд контакта зерен цемента с водой начинает гидратировать алюминат. Это может привести к быстрому схватыванию цементного теста. Для его предотвращения при помолке цемента вводят гипсовый камень. В начальный период твердения алюминат реагирует с ним. Образуются крупные кристаллы гидросульфалюмината кальция  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot \text{H}_{31}$ ). Они закрывают воде доступ к алюминату, что и замедляет начало схватывания цемента до желательной величины 2–3 ч.

Второй минерал по скорости гидратации – алит. Он начинает взаимодействовать с водой уже через 20 – 30 мин после затворения бетонной смеси. Гидросиликаты кальция, образующиеся при этом, вносят основной вклад в набор ранней прочности и вообще в твердение бетона в течение первого месяца.

Самым медленно твердеющим минералом является белит. Он способствует набору прочности бетона в поздние сроки – до 1 года и более.

Вода затворения уже при приготовлении бетонной смеси насыщается гидроксидом кальция и даже пересыщается им. Поэтому он выделяется в виде кристалликов и оседает на твердых поверхностях (заполнителей). И в дальнейшем жидкая фаза в цементном бетоне представляет собой раствор  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и имеет высокую щелочность (pH = 12 – 13).

Образующиеся при гидратации цемента минералы и слагают затвердевший цементный камень. Они являются «клеящей» матрицей, связывающей заполнители в бетонный монолит.

**Физические процессы**, протекающие при твердении бетона, также достаточно сложны. Продукты гидратации, образующиеся на поверхности цементных зерен, обладают высокой дисперсностью, причем наиболее мелкие из них – гидросиликаты кальция. Они имеют форму волокон с субмикроскопическими пустотами между ними. Поперечный размер гидросиликатов составляет 2 – 3 нм<sup>1</sup>, что в тысячи раз меньше, чем размеры зерен цемента. Адсорбируя на своих поверхностях воду, частицы гидросиликатов и ряда других продуктов гидратации образуют гель (п. 1.4). Мельчайшие поры в нем называются гелевыми.

Продукты гидратации постепенно покрывают зерна цемента все утолщающимися оболочками. Они срастаются между собой, образуя цементный камень. Обо-

---

<sup>1</sup> 1 мм = 1000 мкм = 1000000 нм

# Содержание

<b>Введение.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Классический бетон.....</b>	<b>6</b>
1.1. Материалы для бетона.....	6
1.1.1. Портландцемент.....	6
1.1.2. Заполнители.....	8
1.2. Бетонная смесь.....	9
1.2.1. Удобоукладываемость бетонной смеси.....	10
1.2.2. Расслоение бетонной смеси.....	14
1.2.3. Сохраняемость удобоукладываемости бетонной смеси.....	16
1.3. Твердение бетона.....	16
1.4. Структура бетона.....	20
1.5. Прочность бетона.....	22
1.6. Проектирование состава бетона.....	26
1.7. Деформативные свойства и трещиностойкость бетона.....	28
1.8. Физические свойства бетона.....	30
1.9. Долговечность бетона.....	32
1.9.1. Морозостойкость бетона.....	32
1.9.2. Коррозионная стойкость бетона.....	35
1.9.3. Защита бетоном арматуры от коррозии.....	37
<b>2. Бетон с суперпластификаторами.....</b>	<b>38</b>
2.1. Суперпластификаторы.....	39
2.1.1. Поверхностно – активные вещества.....	40
2.1.2. Состав суперпластификаторов.....	41
2.1.3. Механизм действия суперпластификаторов.....	41
2.2. Эффекты суперпластификаторов в бетонной смеси.....	43
2.2.1. Пластифицирующе – водоредуцирующий эффект суперпластификаторов.....	45
2.2.2. Стойкость против расслоения.....	47
2.2.3. Сохраняемость бетонной смеси.....	47
2.3. Структура бетона с суперпластификаторами.....	49
2.4. Влияние суперпластификаторов на прочность.....	50
2.4.1 Стандартная прочность бетона.....	50
2.4.2 Прочность бетона в раннем возрасте.....	54
2.5. Совместимость суперпластификатора и цемента.....	55
2.5.1. Реологическая совместимость.....	56
2.5.2. Прочностная совместимость.....	57
2.6. Деформативные свойства бетона.....	60
2.7. Долговечность бетона с суперпластификаторами.....	61
2.8. Подбор состава бетона с суперпластификатором.....	63
2.8.1. Применение СП для пластификации смеси.....	65
2.8.2. Применение СП для водоредуцирования.....	66
2.8.3. Соотношение оптимальных дозировок, определенных при пластификации и при водоредуцировании.....	68
2.9. Гиперпластификаторы и их эффекты в бетоне.....	69

<b>3. Бетон с минеральными добавками.....</b>	<b>74</b>
3.1. Минеральные добавки.....	74
3.1.1. Активные минеральные добавки.....	76
3.1.2. Инертные добавки.....	78
3.2. Эффекты минеральных добавок в бетоне.....	79
3.2.1. Микронаполняющий эффект.....	79
3.2.2. Пуццолановый эффект.....	84
3.3. Критерии эффективности минеральных добавок в бетоне.....	85
3.4. Бетон с золой.....	90
3.4.1. Образование золы и ее свойства.....	91
3.4.2. Стандартные требования к золе ТЭС.....	92
3.4.3. Влияние золы на свойства бетонной смеси.....	93
3.4.4. Твердение бетона с золой.....	94
3.4.5. Влияние золы на структуру бетона.....	98
3.4.6. Прочность бетона с золой.....	100
3.4.7. Долговечность бетона с золой.....	112
3.4.8. Другие свойства бетона с золой.....	117
3.4.9. Подбор состава бетона с золой.....	119
3.5. Бетон с микрокремнеземом.....	123
3.5.1. Образование и характеристики микрокремнезема.....	123
3.5.2. Влияние микрокремнезема на свойства бетонной смеси.....	124
3.5.3. Эффекты микрокремнезема в бетоне.....	124
3.5.4. Прочность бетона с микрокремнеземом.....	125
3.5.5. Долговечность бетона с микрокремнеземом.....	126
<b>4. Бетон с воздухововлекающими добавками.....</b>	<b>132</b>
4.1. Воздушная фаза в бетонной смеси.....	132
4.2. Воздушные поры в бетоне.....	134
4.3. Влияние воздушных пор на свойства бетона.....	135
4.4. Защитное действие воздушных пор.....	136
4.4.1. Механизм защитного действия.....	136
4.4.2. Эффекты естественных и искусственных воздушных пор.....	138
4.5. Искусственное воздухововлечение в бетонную смесь.....	138
4.5.1. Воздухововлекающие добавки и механизм воздухововлечения.....	138
4.5.2. Факторы, влияющие на воздухововлечение.....	140
4.5.3. Влияние воздухововлечения на свойства бетонной смеси.....	144
4.6. Критерии эффективности воздушных пор.....	144
4.6.1. Объем воздуха в бетонной смеси.....	145
4.6.2. Фактор расстояния.....	145
4.7. Морозостойкость бетона с искусственно вовлеченным воздухом.....	147
4.7.1. Влияние водоцементного отношения.....	148
4.7.2. Обеспечение морозостойкости бетона.....	149
4.8. Проблемы технологии бетона с искусственно вовлеченным воздухом.....	151
4.9. Определение содержания и параметров воздушных пор.....	152
4.9.1. Определение объема воздуха в бетонной смеси.....	152
4.9.2. Определение объема воздушных пор в затвердевшем бетоне.....	153
4.10. Проектирование состава бетона с искусственно вовлеченным воздухом.....	154