

Добавки в бетон

Справочное пособие

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 504
ББК 20.1
Д55

Д55 Добавки в бетон: Справочное пособие / – М.: Книга по Требованию, 2023. – 572 с.

ISBN 978-5-458-36035-7

В книге международного коллектива авторов освещен опыт применения добавок в бетоны с учетом современных достижений науки и практики. Рассмотрены состав, свойства, технология применения, перспективные направления использования добавок разных классов. Приведены сведения по сырьевым ресурсам и ориентировочной экономической эффективности добавок. Рекомендовано к изданию Государственным всесоюзным научно-исследовательским институтом цементной промышленности «НИИцемент» и Министерством промышленности строительных материалов СССР.

ISBN 978-5-458-36035-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

нические поверхностно-активные вещества принято называть не водопонижителями, а пластифицирующими добавками (однако с оговоркой, что за счет пластифицирующего эффекта они позволяют понизить водопотребность). С той же целью в книге сохранены многие термины, которые в СССР используются сравнительно редко (например, удобообрабатываемость смеси, названия некоторых полимеров и т. д.). В большинстве глав практически полно представлены не только текст, но и рисунки и таблицы. Заметному сокращению подверглись лишь первая и восьмая главы; первая потому, что она не имеет прямого отношения к добавкам — в ней излагаются общетеоретические вопросы, ранее более подробно описанные в недавно переведенной на русский язык книге В. С. Рамачандрана с соавторами «Наука о бетоне» (М.: Стройиздат, 1986.—278 с). Что касается восьмой главы, то мы не сочли нужным излагать в ней данные, известные советским читателям по нормативным материалам.

Таким образом, архитектура книги не претерпела изменений. Это означает, что каждая глава по существу почти полностью автономна. В подобном принципе есть своя логика: читателю, интересующемуся каким-либо одним классом добавок, незачем обращаться к другим главам.

Отдельного обсуждения заслуживает, по-видимому, последняя глава. Мы считаем включение ее в справочное пособие полезным вдвойне: во-первых, систематизация патентной литературы по добавкам разного назначения позволяет правильно оценить общее состояние проблемы. Во-вторых, в результате объективного анализа этих данных можно выявить те страны, которые могут быть отнесены к числу передовых в области разработки новых

добавок в бетон и их сочетаний друг с другом. Особенно приятно, что в число таких передовых наиболее активных государств входит СССР. К сожалению, обзор патентной литературы в десятой главе ограничен 1981 г. Поэтому желательно было бы расширить патентные поиски, доведя их до последних лет. Хотелось бы, чтобы Стройиздат поддержал подобную инициативу путем публикации соответствующих материалов.

Наконец, нельзя не отметить и некоторые недочеты, допущенные при издании этого справочного пособия: в полном соответствии с названием в нем рассматриваются лишь добавки в цементные бетоны. Понимая, что это направление главное, мы тем не менее полагаем, что весьма актуально также введение добавок и в бетоны на других минеральных вяжущих веществах: гипсовых, известковых и т. п., тем более, что обычно эффективными при этом оказываются те же или близкие по природе добавки. Советским специалистам можно пожелать учесть это обстоятельство.

В заключение хотелось бы выразить надежду, что данная книга принесет пользу многим советским специалистам и будет способствовать дальнейшему совершенствованию применения в строительстве добавок — этого исключительно прогрессивного и гибкого способа улучшения практически всех свойств бетонных смесей и бетонов.

Главы 1—5 и 8 переведены канд. хим. наук Т. И. Розенберг, главы 6, 7, 9 и 10 — А. С. Болдыревым. Научный редактор глав 1—5 — д-р хим. наук, проф. В. Б. Ратинов, научный редактор глав 6, 7, 9 и 10 — А. С. Болдырев.

А. С. Болдырев, В. Б. Ратинов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Добавки — вещества, вводимые в бетонную смесь либо непосредственно перед перемешиванием, либо во время перемешивания. Они регулируют сроки схватывания цемента, улучшают удобоукладываемость бетонной смеси, воздействуют на процессы ее твердения, повышают прочность бетона, его морозо- и сульфатостойкость и т. п. В специальных бетонах добавки выполняют и функции цветных пигментов, расширяющих или газообразующих агентов и др. В силу этого 80 % всего выпускаемого в США бетона содержит добавки одного или нескольких типов.

По данным выполненного мной обзора литературы за последние семь лет, значительно возросло число работ в этой области. Так, с 1976 по 1981 г. опубликовано по меньшей мере 550 патентов только на составы добавок. Однако, несмотря на интенсивные исследования по применению добавок, во многих случаях их реализация не имеет строго научной основы. Поэтому возникла необходимость обобщить вопросы, касающиеся механизма действия наиболее распространенных добавок, рассмотреть их свойства, технологию приготовления и использования, сведения об их доступности, ограничения при работе с ними, патентные данные и некоторые другие общие вопросы, вытекающие из особенностей применения таких добавок.

В составлении этой книги участвовали специалисты разных стран, имеющие международный авторитет. Хотя было предпринято все возможное, чтобы информация о добавках была наиболее

полной, тем не менее в отдельных случаях пришлось идти на компромисс из-за ограниченного объема книги, недостатка конкретной информации и осторожности научного редактора. Вследствие недостаточности некоторых специальных данных не всегда удавалось в полной мере сохранить столь необходимое единообразие в изложении материала.

Книга состоит из десяти глав и охватывает все основные добавки. Каждая из глав содержит ссылки на публикации последнего времени, которые могут быть полезными при более глубоком изучении вопроса. Глава «Наука о цементе» включена для того, чтобы изложенные в ней современные концепции облегчили понимание остальных глав. В главе «Патенты» показано, какая широкая гамма материалов — природных, синтетических и отходов — может быть использована для получения добавок различного назначения.

Справочное пособие рассчитано на практических работников, использующих и производящих добавки, инженеров-технологов и научных сотрудников, занятых исследованиями в области бетона и цемента, а также на студентов, изучающих технологию и свойства бетона.

Автор приносит благодарность всем лицам, оказавшим помощь при подготовке данного издания.

*Оттава, Канада,
март, 1984 г. В. С. РАМАЧАНДРАН*

1. НАУКА О ЦЕМЕНТЕ

В. С. РАМАЧАНДРАН, Р. Ф. ФЕЛЬДМАН (Оттава, Канада)

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Бетон — композиционный материал, изготовленный из цемента, заполнителей, добавок и воды. Хотя заполнители составляют три четверти объема бетона, его активная составляющая — цементный камень, поэтому свойства и рабочие характеристики этого искусственного материала определяются в большей степени свойствами затвердевшего цемента. Добавки, воздействуя на цемент, вызывают ускорение или замедление схватывания, воздухововлечение, водопонижение, пластификацию и др.

Ниже рассмотрены важнейшие физические, химические и механические характеристики цементного камня, на которые удастся воздействовать введением добавок. Это будет служить основой для понимания поведения цемента, бетонной смеси и бетона, получаемых с применением различных типов добавок, которым будут посвящены последующие главы.

1.2. ПОЛУЧЕНИЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Согласно ASTM C-150, портландцемент — гидравлическое вяжущее, полученное измельчением клинкера, состоящего в основном из гидравлически активных силикатов кальция. Портландцемент обы-

чно содержит одну или более форм сульфата кальция в качестве порошкообразной добавки.

Сырьевые материалы для производства портландцемента содержат в соответствующих пропорциях кремнезем, оксид алюминия, оксиды кальция и железа. Известь получают из известняка и мела, оксиды кремния и алюминия — из глинистых сланцев, глины и мергелей, железо — из пирита.

Оксид железа не только служит в качестве флюса, но и образует соединения с известью и оксидом алюминия. Сырьевые материалы содержат в небольших количествах такие вещества, как оксид магния, щелочи, фосфаты, фтористые соединения, оксиды цинка и свинца, а также сульфиды.

Цементный клинкер получают, обжигая во вращающейся печи измельченную породу и просеянную сырьевую смесь; температура в печи 1300—1450 °C. На образование 1 г клинкера расходуется около 1100—1400 ккал. Порядок реакции следующий. При температуре около 100 °C (зона сушки) удаляется свободная вода, при 100—750 °C (предобжиговая зона) — устойчиво связанная вода из глины. В окислительной зоне (750—1000 °C) диссоциирует карбонат кальция, в обжиговой зоне (1000—1450 °C) проходит частичное плавление

смеси с образованием C_3S , C_2S и формированием клинкера. В зоне охлаждения (1450—1300 °C) расплав кристаллизуется с образованием алюмината и алюмоферрита кальция. После обжига исходного материала образовавшийся клинкер охлаждается и измельчается с 4—5 % гипса до заданной степени измельчения. Для облегчения помола вводят полярные поверхностно-активные вещества.

1.3. СОСТАВ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Основные фазы портландцементного клинкера — трехкальциевый силикат ($3CaO \cdot SiO_2$), двухкальциевый силикат ($2CaO \cdot SiO_2$), трехкальциевый алюминат ($3CaO \cdot Al_2O_3$) и ферритная фаза усредненного состава $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$. В промышленном клинкере они не присутствуют в чистых формах. $3CaO \cdot SiO_2$ представляет собой твердый раствор, содержащий Mg и Al, который называется алитом. В клинкере он состоит из моноклинической и тригональной форм, однако синтезированный $3CaO \cdot SiO_2$ — триклинный. Фаза $2CaO \cdot SiO_2$

встречается в β -форме, называемой белитом, и содержит, кроме Al и Mg, немного K_2O . Известны четыре формы C_2S : α , α' , β и γ , однако в клинкере существует лишь β -форма с моноклинной первичной ячейкой.

Ферритная фаза, обозначаемая как C_4AF , представляет собой твердый раствор переменного состава: от C_2F до C_6A_2F . Возможные компоненты этого соединения — C_6AF_2 , C_2F , C_4AF и C_6A_2F . В некоторых клинкерах могут образовываться небольшие количества алюмината кальция с формулой NC_8A_3 .

В стандарте ASTM C-150 описывается пять основных типов портландцемента. Тип I — нормальный, когда не оговаривают специальные свойства, как у некоторых других цементах; тип II — умеренно сульфатостойкий цемент, или цемент с умеренным тепловыделением; тип III — быстротвердеющий в ранний период; тип IV — с малым тепловыделением; тип V — сульфатостойкий. Основной состав, тонкость помола и характеристики прочности при сжатии этих цемента показаны в табл. 1.1.

Таблица 1.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ТОВАРНЫХ ЦЕМЕНТОВ США

Тип по ASTM	Название по ASTM	Состав			
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
I	Общего назначения	50	24	11	8
II	Умеренно сульфатостойкий с умеренным тепловыделением	42	33	5	13
III	Быстротвердеющий в ранний период	60	13	9	8
IV	С малым тепловыделением	26	50	5	12
V	Сульфатостойкий	40	40	4	9

Примечание. Все цементы достигают примерно равной прочности через 90 сут.

Портландцемент может быть смешан с другими ингредиентами, образуя смешанные гидравлические цементы. В ASTM C-595 содержатся пять типов таких смешанных цементов. Шлакопортландцемент на доменных шлаках состоит из тщательно измельченной смеси портландцементного клинкера и гранулированного доменного шлака или тщательно и однородно смешанных портландцемента и тонкогранулированного доменного шлака, в котором шлаковая составляющая находится в определенных пределах.

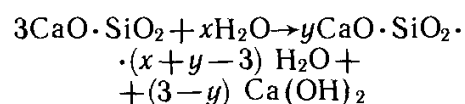
Пуццолановый портландцемент состоит из тщательно перемешанной гомогенной смеси пуццолана с портландцементом или шлакопортландцементом на доменных шлаках. Шлаковый цемент состоит (главным образом) из гранулированного доменного шлака и гидратированной извести. К остальным цементам относятся модифицированный пуццоланой портландцемент (пуццолана <15 %) и модифицированный шлаком портландцемент (шлака <25 %).

Тонкость помола, см ² /г	Прочность при сжатии, % прочности цемента типа I, через сут		
	1	2	28
1800	100	100	100
1800	75	85	90
2600	190	120	110
1900	55	55	75
1900	65	75	85

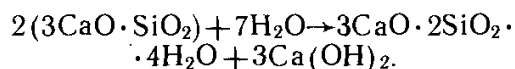
1.4. ПРОДУКТЫ ГИДРАТАЦИИ

1.4.1. Трехкальциевый силикат. Понимание поведения при гидратации индивидуальных составляющих цемента и их смесей — основа для интерпретации сложных реакций, протекающих при гидратации цемента в различных условиях.

Трехкальциевый и двухкальциевый силикаты составляют 75—80 % цемента (см. табл. 1.1). В присутствии ограниченных количеств воды реакция между C_3S и водой может быть представлена следующим образом:



или более конкретно:



Приведенные выше уравнения реакции приблизительны, поскольку нелегко определить состав C-S-H (отношения C/S и S/H); кроме того, имеются проблемы, связанные с определением $Ca(OH)_2$. В полностью гидратированном цементе или C_3S 60—70 % твердой фазы состоит из C-S-H. Он плохо закристаллизован, содержит частицы коллоидных размеров, показывает два размытых небольших пика на рентгенограмме. Степень гидратации C_3S может быть измерена определением C_3S или $Ca(OH)_2$ рентгеновским методом, неиспаряемой влаги прокаливанием или $Ca(OH)_2$ термическим или химическим методами. Каждый из этих методов

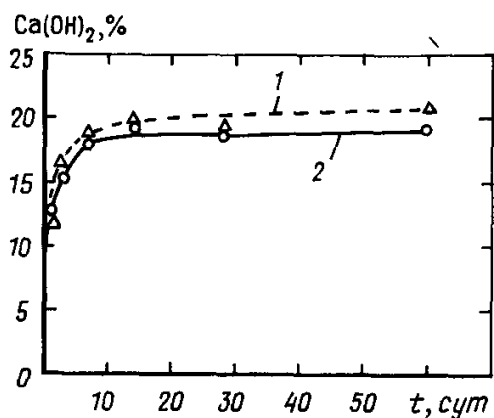


Рис. 1.1. Зависимость содержания гидроксида кальция, образующегося при гидратации C_3S , от времени гидратации

1—химический метод; 2—термический метод

имеет свои ограничения. Количество Ca(OH)_2 , определенное рентгеновским и химическим методами, неодинаково. К примеру, в работе [2] найдено 22 % Ca(OH)_2 в камне из портландцемента рентгеновским методом, а химическим методом (экстракция) Ca(OH)_2 определяется на 3—4 % больше. Эту разницу можно отнести за счет аморфного Ca(OH)_2 . С другой стороны, в работе [3] сообщается, что метод экстракции дает Ca(OH)_2 на 30—90 % больше, чем рентгеновский метод. Термогравиметрический метод анализа приводит к тем же величинам, что и рентгеновский. В последнее время дифференциально-термический анализ был применен в работах [4, 5] для определения Ca(OH)_2 в гидратированном C_3S .

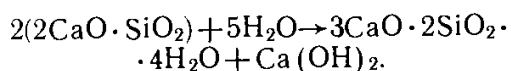
На рис. 1.1 сравниваются относительные количества Ca(OH)_2 , образовавшегося в разные периоды гидратации, определенного при применении химического метода и диффе-

ренциально-термического анализа (ДТА). Хотя общая тенденция аналогична, результирующая величина выше при применении химического метода. Это может быть объяснено воздействием на фазу C-S-H растворителей, используемых при химической экстракции. Отсюда ясно, что определение состава C-S-H, которое основано на определении C_3S и Ca(OH)_2 , имеет ограничения. Состав фазы C-S-H может быть изменен с помощью добавок. Прямой метод определения отношения C/S основан на таких методах, как электронная микроскопия или электронная спектроскопия. Несмотря на то что имеется несколько различающихся величин, в основном отношение C/S после небольшой продолжительности гидратации находится в пределах 1,4—1,6 [6]. Имеются проблемы, связанные с определением воды, химически связанной в C-S-H. Встречаются затруднения при дифференциации ее от поровой воды. Стехиометрию C-S-H определяют в предположении, что в пробе либо вовсе не остается, либо остается очень мало адсорбированной влаги в условиях d-сушки (давление паров воды при температуре сублимации твердого CO_2 , т. е. при -78°C). В недавних исследованиях было показано, что высшие гидраты могут существовать и при влажности, близкой к d-сухим условиям [7].

Считается, что высушивание до относительной влажности (ОВ) 11 % является надежным способом для изучения стехио-

метрии гидратов силиката кальция. В этих условиях может быть с достаточной надежностью оценена адсорбированная вода. Не следует полагать, что высшие гидраты не существуют при ОВ выше 11 %. Согласно работе [8] C_3S , гидратированный в колбе до C-S-H и доведенный до равновесия при 11 % ОВ (начиная со 100 % ОВ), имеет состав $3,28CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3,92H_2O$.

1.4.2. Двухкальцевый силикат. При гидратации C_2S , как и C_3S , имеются неопределенности, связанные с нахождением стехиометрического состава фазы C-S-H; гидратация двухкальцевого силиката может быть представлена следующим уравнением:



Количество $Ca(OH)_2$, образующегося в результате такой реакции, меньше, чем при гидратации C_3S . Фаза двухкальцевого силиката гидратируется намного медленнее, чем фаза трехкальцевого силиката.

На рис. 1.2 сравниваются между собой скорости гидратации C_3S и C_2S . Абсолютные значения скоростей неодинаковы в разных пробах; это индивидуальная характеристика, однако в среднем скорость реакции у C_3S намного выше.

Повышенную реакционную способность C_3S объясняют следующими причинами: в C_3S координационное число Ca^{2+} выше 6; координация Ca^{2+} нерегулярна; в кристаллической решетке C_3S имеются пустоты;

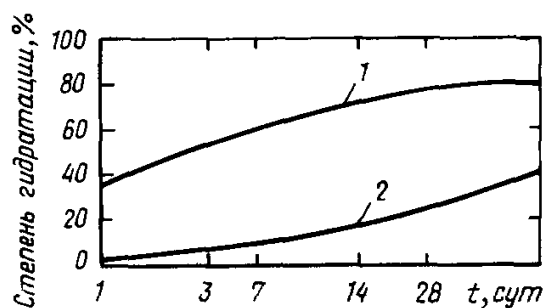


Рис. 1.2. Кинетика изменения относительной степени гидратации C_3S (1) и C_2S (2)

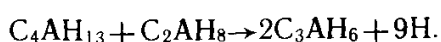
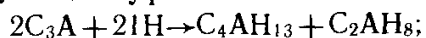
наблюдаются различия, встречающиеся в позициях на Ферми-уровнях. Проведены некоторые предварительные работы для определения относительной реакционной способности Ca^{2+} в CaO , $Ca(OH)_2$, C_3S и при смешивании каждого из них с известными количествами $AgNO_3$ [9]. Найдено, что при последующем нагревании реакция $AgNO_3$ с CaO , $Ca(OH)_2$ и гидратированным C_3S стехиометрична относительно Ca^{2+} . Только 27 % Ca^{2+} , присутствующего в C_3S , и 6 % Ca^{2+} из C_2S реагируют с $AgNO_3$. Возможно, что активности C_3S и C_2S являются таковыми вследствие дефектов в их структуре. Имеются данные о том, что при гидратации C_3S , полученного присоединением одной молекулы меченого Са к C_2S , начальные продукты реакции содержат в основном меченый ион Ca^{2+} . Необходимы дальнейшие работы, прежде чем будут сделаны окончательные выводы.

1.4.3. Трехкальцевый алюминат. Несмотря на то что среднее содержание C_3A в портландцементе составляет 4—11 %,

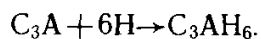
его влияние весьма заметно на начальной стадии гидратации. Он обычно ответствен за феномен «ложного» схватывания; образование различных гидратов алюминатов кальция, карбо- и сульфоалюминатов также имеет место при реакциях C_3A . Большие количества C_3A в портландцементе могут повлиять на долговечность бетона. К примеру, цемент для бетона, который будет выдерживаться в сульфатных растворах, не может содержать более 5 % C_3A .

Трехкальциевый алюминат реагирует с водой, образуя C_2AH_8 и C_4AH_{13} (гексагональные фазы). Эти продукты термодинамически нестабильны, поэтому без стабилизации или добавок они переходят в фазу C_3AH_6 (кубическая фаза).

Ниже приведены соответствующие уравнения:



В насыщенном растворе $Ca(OH)_2$ C_2AH_8 реагирует с $Ca(OH)_2$, образуя в зависимости от условий C_4AH_{13} или C_3AH_6 . Кубическая форма (C_3AH_6) может образоваться и в результате непосредственной гидратации C_3A при 80 °C или более высокой температуре [10, 11]:

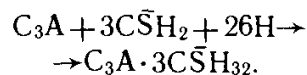


При нормальных условиях гидратации камень из C_3A дает меньшую прочность, чем из силикатных фаз, вследствие образования кубической фазы C_3AH_6 .

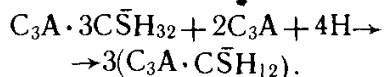
При определенных условиях

гидратации, т. е. при низких водотвердых отношениях (В/Т) и высокой температуре, прямое образование C_3AH_6 (приводящее к возникновению непосредственных связей между частицами) может существенно повысить прочность. В портландцементе гидратация фазы C_3A контролируется добавлением гипса. Таким образом снимается «ложное» схватывание.

Фаза C_3A реагирует с гипсом в течение нескольких минут, образуя этtringит,



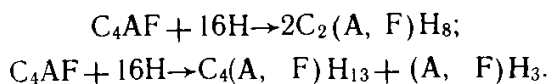
После того как весь гипс перейдет в этtringит, избыток C_3A вступает в реакцию с этtringитом, образуя низкосульфатную форму гидросульфоалюмината кальция,



Гипс — более эффективный замедлитель гидратации C_3A , чем известь; вместе они еще более эффективны, чем каждый в отдельности.

1.4.4. Ферритная фаза, составляющая в среднем 8—13 % состава портландцемента, имеет различный состав, выраженный как $C_2(A_nF_{1-n})$, где $0 < n < 0,7$. Среди цементных минералов ее гидратационные и физико-механические характеристики привлекают значительно меньшее внимание. Это частично может быть объяснено тем, что ферритная фаза и C_3A ведут себя сходным образом. Однако очевидно, что имеются и значительные различия между ними.

Известно, что фаза C_4AF дает в целом те же продукты гидратации, что и C_3A , но при более медленном протекании реакции. В присутствии воды C_4AF реагирует следующим образом:



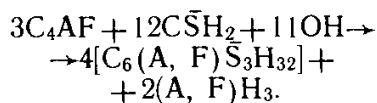
При реакциях C_4AF образуются аморфные продукты. Термодинамически стабильная фаза $C_3(A, F)H_6$ — это продукт превращения гексагонального гидрата. Иногда образование этого гидрата вызывает ложное схватывание цемента.

Гидратация C_4AF при низком B/T и высокой температуре может увеличить степень прямого образования кубической фазы [12]. Результаты измерений микротвердости показывают, что при $B/T=0,13$ пробы, гидратированные при 23 и 80 °C, имеют микротвердость до 874 и 1770 МПа соответственно. Большая прочность при более высокой температуре может быть объяснена прямым образованием из C_4AF кубического C_3AH_6 . Это приводит к их более тесному соединению с ростом механической прочности.

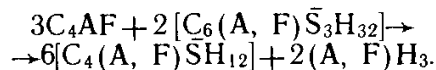
В цементе в присутствии гипса C_4AF реагирует значительно медленнее, чем C_3A . Другими словами, гипс более эффективно замедляет гидратацию C_4AF , чем C_3A .

Скорость гидратации зависит от состава ферритной фазы; с ростом содержания железа снижается скорость гидратации. Реакция C_4AF с гип-

сом протекает следующим образом [13]:



Низкосульфатная форма гидросульфоалюмината кальция может образоваться при реакции избытка C_4AF с высокосульфатной формой



При низком B/T и высокой температуре низкосульфатная форма гидросульфоалюмината кальция может образоваться непосредственно.

Вышеприведенное уравнение включает образование гидроксидов Al и Fe вследствие недостатка извести в C_4AF . В этих продуктах F может быть заменено A. Соотношение между A и F может быть не таким, как в исходном материале.

1.4.5. Портландцемент. Хотя изучение гидратации чистых цементных составляющих само по себе полезно для прослеживания гидратационных процессов в портландцементе, оно не может быть непосредственно применено к цементам вследствие сложности протекающих реакций. В портландцементе минералы состоят не из чистых фаз: они являются твердыми растворами, содержащими Al, Mg, Na и т. д. Изучение гидратации алита, содержащего различные количества Al, Mg или Fe, показало, что при той же степени гидратации Fe алит достигает большей прочности. Очевидно, что C-S-H, образующийся из различных видов

алита, неодинаков [15]. На гидратацию C_3A , C_4AF и C_2S в цементе влияет изменение количества Ca^{2+} или OH^- в гидратном растворе. Реакционная способность C_4AF может зависеть от количества SO_4^{2-} -ионов, потребляемых C_3A . Концентрация SO_4^{2-} -ионов может быть понижена их адсорбцией на фазе C-S-H. Известно также, что гипс воздействует на скорость гидратации силикатов кальция. Значительные количества Al и Fe связаны в структуре C-S-H. На гидратацию индивидуальных фаз оказывает влияние также присутствие щелочей в портландцементе. По их влиянию на скорость гидратации портландцемента в ранние сроки твердения (несколько дней) минералы цемента можно расположить в следующем порядке: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$.

Скорость гидратации составляющих портландцемента зависит от размеров кристаллов, их дефектности, размеров частиц и их распределения по размерам, скорости охлаждения клинкера, площади поверхности, наличия добавок, температуры и т. д.

В гидратированном портландцементе образуются такие продукты гидратации, как гель C-S-H, $Ca(OH)_2$, этtringит (A, F-3-фазы), моносulfатная (A, F-1-фаза), гидрогранаты и, возможно, аморфные фазы с высоким содержанием ионов (Al^{3+} и SO_4^{2-}) [6].

Фаза C-S-H представлена в цементном камне аморфными или полукристаллическими гидратами силикатов кальция (де-

фис означает, что в геле молекулярное соотношение $CaO:SiO_2$ не обязательно равно 1:1). Строение порошка C-S-H из цементного камня сходно с таковым в камне из C_3S . Состав C-S-H (в смысле отношения C/S) меняется в зависимости от времени гидратации. Через 1 сут. отношение C/S близко к 2, приходя к 1,4—1,6 после нескольких лет гидратации. C-S-H может захватывать значительные количества ионов Al^{3+} , Fe^{3+} и SO_4^{2-} .

Последние исследования показали, что в камне как из C_3S , так и в цементном, мономер, присутствующий в исходных C_3S и C_2S (тетраэдр SiO_4^{4-}), полимеризуется во времени в димер и более крупные ионы. Газожидкостные хроматографические анализы с получением триметилсилильных производных показали, что отсутствуют анионы с тремя и четырьмя атомами Si. По мере гидратации возрастает количество полимеров с пятью атомами Si и более и уменьшается количество димеров. В камне из C_3S мономеры исчезают в результате образования полимеров. В цементном камне, даже после того как C_3S и C_2S прогидратировались, обнаруживается некоторое количество мономеров, возможно, вследствие модификации структуры аниона C-S-H путем замены некоторой части Si атомами Al, Fe или S [6]. Добавки могут воздействовать на скорость процесса полимеризации при гидратации портландцемента и C_3S .