Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Максимов Алексей Борисович
Должность: ректор
Дата подписания: 16.07.2026 11:56:48
Уникальный программный ключ:
8db180d1a3f02ac9e60521a5672742735c18b1d6

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

Кафедра «Промышленное, гражданское и подземное строительство»

И.С. Пуляев, Ю.С. Филимонова

МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА И МАТЕРИАЛЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Учебное пособие
для студентов, обучающихся по специальности
08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений»
и направлению подготовки 08.03.01 «Строительство»,
всех форм обучения

Текстовое электронное издание

Москва
2026

Об издании 1, 2

УДК 691.5(075.8)
ББК 38.32я73
П88

Рецензенты:
В.Б. Петропавловская, д.т.н., профессор кафедры «Производство строительных изделий и конструкций» Тверского государственного технического университета;
Е.В. Ткач, д.т.н., профессор кафедры «Градостроительство» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета

Пуляев, И.С.

П88 **Минеральные вяжущие вещества и материалы на их основе:** учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» и направлению подготовки 08.03.01 «Строительство», всех форм обучения / И.С. Пуляев, Ю.С. Филимонова. – Москва: Московский Политех, 2026. – 1 CD-R. – Загл. с титул. экрана. – Текст: электронный.

ISBN 978-5-2760-2962-7.

Содержатся теоретические сведения по основам технологии производства, составу, структуре, свойствам и рациональным областям применения минеральных вяжущих веществ и материалов на их основе. Описание строительных материалов построено по схеме «технология – состав – структура – свойства – область применения». Знание основных принципов технологии производства позволит будущим специалистам целенаправленно изменять состав и структуру строительных материалов, получая в результате материалы с требуемыми свойствами.

Предназначено для студентов вузов строительных специальностей и направлений подготовки всех форм обучения.

УДК 691.5(075.8)
ББК 38.32я73

Системные требования: PC-совместимый процессор 1,3 ГГц и выше. Оперативная память (RAM): 256 Мб. Необходимо на винчестере: 350 Мб. Операционные системы: Windows, Mac OS. Видеосистема: разрешение экрана 1024x768. Дополнительные программные средства: Adobe Acrobat Reader 9 и выше.

ISBN 978-5-2760-2962-7

© Пуляев И.С., Филимонова Ю.С., 2026
© Московский Политех, 2026

Содержание

Введение 5

1. МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА 6
1.1. Общие сведения 6
1.2. Воздушная строительная известь 7
1.3. Гипсовые вяжущие вещества 11
1.4. Жидкое стекло 16
1.5. Магнезиальные вяжущие вещества 18
1.6. Портландцемент 19
1.7. Специальные виды портландцемента 34
1.8. Глиноземистый цемент 38
1.9. Смешанные вяжущие 42

2. БЕТОНЫ НА МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ 45
2.1. Общие сведения 45
2.2. Классификация бетонов (ГОСТ 25192–2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования) 45
2.3. Материалы для тяжелого бетона 47
2.4. Бетонная смесь и ее основные свойства (ГОСТ 7473–2010. Смеси бетонные. Технические условия) 53
2.5. Закон прочности бетона 61
2.6. Понятие класса бетона по прочности 63
2.7. Основные показатели качества бетона 67
2.8. Физико-механические свойства бетона 67
2.9. Порядок расчета начального состава бетона 69
2.10. Производственные факторы прочности бетона 72
2.11. Основные виды добавок для бетонов 73
2.12. Легкие бетоны на пористых заполнителях 75
2.13. Ячеистый бетон 77
2.14. Мелкозернистый бетон 80
2.15. Понятие о железобетоне 81

3. СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАСТВОРЫ 85
3.1. Общие сведения 85

3.2. Исходные материалы: заполнители, наполнители, добавки 87
3.3. Свойства строительных растворов 91
3.4. Общие сведения о сухих строительных смесях и их преимущества 94
3.5. Особенности состава и производства сухих смесей 96
3.6. Разновидности сухих строительных смесей 99
3.7. Оценка качества сухих строительных смесей. Условные обозначения 101
3.8. Особенности производства работ при применении сухих строительных смесей и их технико-экономическая эффективность 103
Контрольные вопросы 106
Заключение 107
Список литературы 108

Введение

Строительные материалы оказывают решающее влияние на технико-экономическую эффективность, безопасность строительства и эксплуатацию зданий и сооружений. Строительные материалы составляют более 50 % сметной стоимости объектов.

Существенно отличаются формы частей и конструкций зданий и сооружений, построенных в древности или даже в начале XIX века, от современных. Стеновые, каркасные конструкции неузнаваемо изменились под влиянием новых строительных материалов.

И лишь в XX веке были широко внедрены материалы, обладающие высокими прочностными характеристиками при изгибе и растяжении. Производство новых материалов привело к изменению традиционных форм и появлению неограниченных возможностей для создания конструкций любой сложности и размеров.

Свою вещественную форму архитектурные и дизайн-объекты обретают с помощью природных или искусственных материалов – основы развития новых конструктивных структур. Современные материалы не только определяют реальность осуществления творческого замысла, новых форм и конструктивных систем, но и в значительной степени обусловливают характер и эстетическую выразительность, экономическую и функциональную целесообразность архитектурных и дизайн-объектов.

Сегодня развитие научно-технического прогресса позволяет, с одной стороны, расширять выпуск и совершенствовать качество традиционных материалов, с другой – создавать новые эффективные искусственные материалы и изделия с заранее заданными свойствами, отвечающими комплексу предъявляемых к ним требований.

Настоящее учебное пособие знакомит обучающихся с классификацией строительных материалов и изделий на основе минеральных расплавов, а также их основными характеристиками. Оно разработано в соответствии с основными положениями и требованиями Федерального государственного образовательного стандарта по направлению подготовки «Строительство» и специальности «Строительство уникальных зданий и сооружений» и предназначено для студентов всех форм обучения, а также специалистов строительной отрасли.

1. МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

1.1. Общие сведения

Вяжущие вещества используются для получения широкого спектра строительных материалов: бетонов, строительных растворов, сухих строительных смесей, гидроизоляционных, кровельных, теплоизоляционных, полимерных материалов и др. Вяжущие вещества обладают ценным свойством – соединяют отдельные компоненты материала (например, зерна песка, гравия, щебня в бетоне) в единое целое.

По составу вяжущие вещества делят на две группы:

- **Неорганические** (минеральные), которые затворяют водой, реже – водными растворами солей. К ним относятся известь, цементы, гипсовые вяжущие, жидкое стекло, магнезиальные вяжущие и др.
- **Органические**, переводимые в рабочее состояние нагреванием или растворением в органических растворителях (битумы, полимеры). Для этой группы часто применяется термин «связующее».

Неорганические вяжущие вещества – порошкообразные материалы, которые при смешивании с водой образуют пластично-вязкое тесто, способное со временем самопроизвольно затвердевать в результате физико-химических процессов. Это свойство широко используют при изготовлении искусственных безобжиговых материалов: бетонов, строительных растворов, силикатного кирпича, асбестоцементных изделий, гипсокартонных листов и др.

Неорганические вяжущие вещества по условиям твердения и водостойкости делятся на три группы:

- **Воздушные вяжущие вещества** способны затвердевать и длительно сохранять прочность только на воздухе. К ним относятся воздушная строительная известь, гипсовые вяжущие, магнезиальные вяжущие, жидкое стекло.
- **Гидравлические вяжущие вещества** способны твердеть и длительное время сохранять прочность (или даже повышать ее) не только на воздухе, но и в воде. К гидравлическим вя-

жущим относятся портландцемент и его разновидности, глиноземистый цемент и его разновидности.

- **Вяжущие вещества автоклавного твердения** эффективно твердеют (быстро набирают прочность) только в среде насыщенного водяного пара в автоклавах (при температуре 175…200 °С и давлении 0,8…1,3 МПа). К ним относятся известково-кремнеземистые, известково-зольные, известково-шлаковые вяжущие, нефелиновый цемент и др.

Существенный вклад в развитие теории минеральных вяжущих внесли видные российские (русские, советские) и зарубежные ученые – Волженский А.В., Ферронская А.В., Будников П.П., Ле Шателье А., Тейлор Х., Богг Р., Байков А.А., Юнг В.Н., Хигерович М.И., Кузнецова Т.В. и многие другие.

1.2. Воздушная строительная известь

Общие сведения

Воздушная известь – воздушное вяжущее вещество, получаемое в результате умеренного обжига (ниже температуры спекания) кальциево-магниевых карбонатных горных пород.

Известь – древнейшее вяжущее вещество, которое было известно за несколько тысяч лет до нашей эры.

Сырьем для производства воздушной извести служат известняки, мел, доломитизированный известняк, доломит с содержанием глинистых примесей не более 6 %. Основной составляющей известняка и мела является минерал кальцит $CaCO_3$, доломита – минерал доломит $CaCO_3 \cdot MgCO_3$.

Производство и виды извести. Технология производства воздушной извести включает добычу сырья, его подготовку (дробление, сортировку по крупности и др.), обжиг, гашение извести или помол, упаковку готового продукта.

На обжиг известняк поступает в виде кусков размером 8…20 см. Обжиг производят в шахтных или вращающихся печах при температуре 900…1200 °С до возможно более полного удаления CO_2 по реакциям: $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2\uparrow$, $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO2\uparrow$.

Выделяющийся при термической диссоциации $CaCO_3$ углекислый газ CO_2 составляет 44 % от массы $CaCO_3$, поэтому обра-

зующаяся **комовая негашеная известь** (CaO + MgO) получается в виде пористых кусков, активно взаимодействующих с водой. Комовая известь – это полуфабрикат, из которого получают вяжущее – молотую негашеную известь или гашеную известь.

Молотая негашеная известь – порошок, получаемый тонким помолом комовой извести (без предварительного гашения).

Процесс взаимодействия извести с водой называется гашением, а получаемый продукт – **гашеной известью:**

$$CaO + H2O \rightarrow Ca(OH)2 + Q.$$

Воздушная известь – единственное вяжущее, которое можно перевести в тонкодисперсное состояние не только помолом, но и гашением (химическим диспергированием). Гашение извести протекает с выделением такого большого количества теплоты (1163 кДж/кг), что смесь закипает, поэтому комовую негашеную известь называют также **известью-кипелкой**. Из-за испарения воды при «закипании» смеси гашеная известь самопроизвольно рассыпается («распушивается») в тонкодисперсный порошок с размером частиц 5…20 мкм, который называют **известью-пушонкой**, или **гидратной известью**. Если известь гасится в избытке воды, получают известковое тесто (2–3 части воды на 1 часть извести-кипелки), или известковое молоко (более трех частей воды).

Твердение извести. Строительные растворы на молотой негашеной извести быстро схватываются и отвердевают вследствие гидратационного твердения:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)2 + Q.$$

При правильно подобранном водоизвестковом отношении 0,9…1,5, кристаллы гидроксида кальция срастаются между собой и быстро образуют достаточно прочный камень.

Твердение гашеной извести происходит медленно, на воздухе и обусловлено двумя одновременно протекающими процессами:

- высыханием раствора, сближением кристаллов Ca(OH)2 и их срастанием;
- карбонизацией извести под действием углекислого газа, содержащегося в воздухе:

$$Ca(OH)2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O.$$

Образующиеся кристаллы $CaCO_3$ срастаются с кристаллами Ca(OH)2, повышая прочность известкового камня. Твердение известковых растворов ускоряется сушкой.

При производстве автоклавных силикатных изделий (силикатного кирпича, автоклавных ячеистых бетонов и др.) из смесей, содержащих известь, молотый кварцевый песок и воду, имеет место гидросиликатное твердение извести:

$$Ca(OH)2 + SiO_2 + mH_2O \rightarrow CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O.$$

При повышенной температуре в автоклаве известь взаимодействует с диоксидом кремния SiO_2 (в виде молотого песка), с образованием малорастворимых в воде низкоосновных гидросиликатов кальция различного состава, обусловливающих прочность и водостойкость силикатных изделий.

Показатели качества и свойства

К основным нормируемым показателям качества воздушной извести относят: активность, количество непогасившихся зерен (недожог и пережог) и время гашения.

Активность – процентное содержание оксидов, способных гаситься. Чем выше содержание основных оксидов в извести (CaO+MgO), тем выше ее сорт и пластичнее известковое тесто.

В зависимости от содержания MgO в обожженном продукте воздушную известь подразделяют на:

- кальциевую: $MgO \leq 5$ %;
- магнезиальную: 5 % $< MgO \leq 20$ %;
- доломитовую: 20 % $< MgO \leq 40$ %.

Частицы недожога и пережога снижают качество извести. Частицы недожога (неразложившиеся при обжиге зерна сырья) отощают известковое тесто, снижают его пластичность. Частицы пережога (остеклованные плотные трудногасящиеся оксиды кальция и магния) крайне медленно гидратируются с увеличением своего объема, что может вызвать растрескивание известковой штукатурки. Воздушная известь должна выдерживать испытание на равномерность изменения объема.

По активности, содержанию непогасившихся зерен и другим показателям химического состава воздушная строительная известь делится на 3 сорта (таблица 1).

Таблица 1

Требования к химическому составу негашеной извести

Наименование показателя	Норма для извести, %, по массе		
	сорт		
	1	2	3
Содержание активных (CaO+MgO), % по массе, не менее: – без добавок – с добавками	 90 (85) 65 (60)	 80 (75) 55 (50)	 70 (65) –
Содержание непогасившихся зерен, % по массе, не более	7 (10)	11 (15)	14 (20)
Содержание CO_2 в составе извести, % по массе, не более: – без добавок – с добавками	 3 (5) 4 (6)	 5 (8) 6 (9)	 7 (11) –

Примечание. В скобках указаны характеристики магнезиальной и доломитовой извести.

Степень дисперсности порошкообразной воздушной извести должна быть такой, чтобы при просеивании пробы извести сквозь сито с сетками № 02 (200 мкм) и № 008 (80 мкм) проходило соответственно не менее 98,0 и 85 % массы просеиваемой пробы.

Истинная плотность негашеной извести колеблется в пределах 3100…3300 кг/м^3. **Насыпная плотность** молотой негашеной извести в рыхлонасыпном состоянии 900…1100 кг/м^3, в уплотненном – 1100…1300 кг/м^3; для гидратной извести в рыхлонасыпном состоянии – 400…500 кг/м^3, в уплотненном – 600…700 кг/м^3.

Воздушную негашеную известь в зависимости от **времени гашения** подразделяют на 3 группы (таблица 2).

Таблица 2

Классификация извести по времени гашения

Группа извести	Время гашения извести
Быстрогасящаяся	не более 8 мин.
Среднегасящаяся	не более 25 мин.
Медленногасящаяся	более 25 мин.

Влажность гидратной извести не должна быть более 5 %. Содержание гидратной воды в негашеной извести не должно быть более 2 %.

Ценнейшее свойство воздушной извести – **высокая пластичность и водоудерживающая способность** известкового теста, обусловленные огромной удельной поверхностью частиц.

Прочность известковых растворов невысока: предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток воздушного твердения составляет 0,4…1,0 МПа у растворов на гашеной извести и до 5,0 МПа у растворов на молотой негашеной извести. Поэтому в отличие от других вяжущих известь не делится на марки по прочности; прочность воздушной извести не нормируется. При длительном твердении (годы и десятки лет) прочность известковых растворов может увеличиваться до 7…10 МПа вследствие дальнейшей карбонизации и образования гидросиликатов кальция.

В строительстве известь из-за **большой усадки** при твердении и возможного растрескивания применяют только в виде растворов и бетонов, т.е. в смеси с заполнителями.

Применение

Воздушная строительная известь используется при производстве силикатного кирпича и камней, силикатобетонных блоков, плит, панелей автоклавного твердения, изделий из автоклавных ячеистых бетонов, как составная часть смешанных вяжущих (известково-шлаковые, известково-пуццолановые и др.), при производстве сухих строительных смесей, для изготовления известковых красок, для укрепления грунтов.

1.3. Гипсовые вяжущие вещества

Общие сведения

Гипсовые вяжущие вещества – это воздушные вяжущие вещества, состоящие в основном из полуводного гипса $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$.

Существуют также ангидритовые вяжущие, состоящие, преимущественно, из ангидрита $CaSO_4$.

Сырьем для производства гипсовых вяжущих служат минеральная горная порода гипс, состоящая из двуводного сульфата кальция $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, а также отходы химической промышленности, содержащие двуводный или безводный сернокислый кальций, например, фосфогипс (отход при производстве фосфор-

ной кислоты). Сырьем для производства ангидритовых вяжущих служит горная порода гипс или природный ангидрит $CaSO_4$.

Производство гипсовых вяжущих состоит в измельчении и последующей тепловой обработке сырья. В зависимости от температуры обжига, гипсовые вяжущие подразделяются на 2 группы:

- Низкообжиговые (температура обжига 110…180 °С), составляют более 95 % объема производства гипсовых вяжущих веществ – собственно гипсовые вяжущие, состоящие из полугидрата сульфата кальция;
- Высокообжиговые (температура обжига 600…1000 °С) – ангидритовые.

Низкообжиговые гипсовые вяжущие состоят преимущественно из полуводного гипса $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$. Дегидратация сырья в процессе термической обработки происходит по реакции:

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O\uparrow.$$

Существуют две технологии получения низкообжиговых гипсовых вяжущих:

- Обжиг сырья в открытых агрегатах – варочных котлах или печах, когда вода в процессе обжига удаляется в виде пара. По такой технологии получают **строительный гипс**, который состоит в основном из мелких кристаллов β-$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ и обладает высокой водопотребностью. В строительном гипсе может содержаться небольшое количество ангидрита $CaSO_4$ (пережог) и частицы неразложившегося сырья $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (недожог). Прочность при сжатии образцов из строительного гипса достигает 10…12 МПа.
- Обжиг сырья в герметически закрытых аппаратах в среде насыщенного пара под давлением. В этом случае вода из гипсовой породы удаляется в капельно-жидком состоянии, а получаемый продукт обжига состоит из крупных плотных кристаллов в виде игл или призм. Эта модификация гипса α-$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ называется **высокопрочным гипсом.** Он отличается от β-модификации меньшей водопотребностью, а, следовательно, изделия из такого гипса имеют пониженную пористость и высокую прочность (15–25 МПа).

Высокообжиговые гипсовые вяжущие (ангидритовые вяжущие) состоят преимущественно из ангидрита $CaSO_4$ и 3…5 % CaO, образующегося при разложении $CaSO_4$ и выполняющего

роль активизатора твердения $CaSO_4$. Ангидритовое вяжущее получают обжигом $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ при температуре 600…1000 °С, либо помолом природного ангидрита $CaSO_4$ с добавками-активизаторами твердения (известью, обожженным доломитом и др.). Высокообжиговый гипс имеет прочность 10…20 МПа, по сравнению с низкообжиговыми гипсовыми вяжущими медленно схватывается и твердеет, но обладает повышенной водостойкостью.

Твердение α- и β-модификаций гипса обусловлено переходом их при взаимодействии с водой в двугидрат по реакции:

$$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + Q.$$

Процесс твердения гипса впервые описал французский ученый А. Ле-Шателье (*H. Le Chatelier*) в 1887 г. При смешивании с водой полуводный гипс растворяется до образования насыщенного раствора, в котором он гидратируется с образованием двугидрата. Поскольку растворимость в воде двугидрата в 4 раза меньше, чем полугидрата (2 г/л против 8 г/л), раствор оказывается пересыщенным по отношению к двугидрату, и он в виде кристаллов $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ выделяется из раствора. По мере накопления двугидрата происходит схватывание (загустевание) гипсового теста. После схватывания начинается твердение, обусловленное ростом кристаллов, их срастанием, образованием кристаллического сростка из достаточно крупных кристаллов двуводного гипса. Твердение гипса сопровождается выделением теплоты – 133 кДж/кг для β-модификации.

Показатели качества и свойства

К **нормируемым показателям качества** гипсовых вяжущих относят: марку по прочности, сроки схватывания и степень помола.

По **степени помола** различают 3 вида гипсовых вяжущих (таблица 3).

Таблица 3

Виды гипсовых вяжущих веществ по степени помола

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

Степень помола оценивают путем просеивания пробы вяжущего сквозь сито с размером ячейки 0,2 мм по остатку на сите, выраженному в % массы просеиваемой пробы.

Истинная плотность гипсовых вяжущих изменяется в пределах 2600…2750 кг/м^3. **Насыпная плотность** в рыхлом состоянии составляет 800…1100 кг/м^3, в уплотненном – 1250…1450 кг/м^3.

Водопотребность гипса выражают количеством воды в % массы вяжущего, необходимым для получения гипсового теста *стандартной консистенции*, которое используют при определении сроков схватывания и марки гипсового вяжущего по прочности. Водопотребность гипса не нормируется, определяется подбором (по вискозиметру Суттарда) и существенно влияет на прочность и сроки схватывания гипса: чем она выше, тем больше сроки схватывания и ниже прочность.

Отличительной особенностью гипсовых вяжущих является их **быстрое схватывание и твердение.**

В зависимости от **сроков схватывания** различают 3 вида гипсовых вяжущих (таблица 4).

Таблица 4

Виды гипсовых вяжущих веществ по срокам схватывания

Вид вяжущего	Индекс сроков схватывания	Сроки схватывания, мин	
		начало, не ранее	конец, не позднее
Быстротвердеющее	А	2	15
Нормальнотвердеющее	Б	6	30
Медленнотвердеющее	В	20	не нормируется

Сроки схватывания гипса определяют при помощи прибора Вика с иглой на гипсовом тесте *стандартной консистенции*. Сроки схватывания можно регулировать введением добавок – замедлителей схватывания.

В зависимости от **предела прочности при изгибе и сжатии** установлены **12 марок гипсовых вяжущих** (таблица 5).

Марку гипсовых вяжущих определяют по результатам испытания на изгиб трех образцов-балочек размером 4×4×16 см и испытания на сжатие шести половинок образцов-балочек, изготовленных из гипсового теста **стандартной консистенции** и твердевших на воздухе в течение 2 часов после затворения гипса водой.

Таблица 5

Марки гипсовых вяжущих веществ по прочности

Марка вяжущего	Предел прочности в возрасте 2 ч, МПа, не менее		Марка вяжущего	Предел прочности в возрасте 2 ч, МПа, не менее	
	при сжатии	при изгибе		при сжатии	при изгибе
Г–2	2,0	1,2	Г–10	10,0	4,5
Г–3	3,0	1,8	Г–13	13,0	5,5
Г–4	4,0	2,0	Г–16	16,0	6,0
Г–5	5,0	2,5	Г–19	19,0	6,5
Г–6	6,0	3,0	Г–22	22,0	7,0
Г–7	7,0	3,5	Г–25	25,0	8,0

Гипс – одно из немногих вяжущих, **увеличивающихся в объеме при твердении (до 1 %)**, что способствует изготовлению архитектурных деталей литьевым способом.

Теоретически для гидратации полуводного гипса с образованием двуводного гипса требуется 18,6 % воды от массы гипсового вяжущего. Практически для получения удобоформуемой смеси строительный гипс требует 50…70 % воды, высокопрочный – 30…40 %. Химически несвязанная вода формирует **высокую пористость гипсового камня – 40…60 %. Средняя плотность гипсового камня** при этом составляет **1200…1500 кг/м^3.** Свежеизготовленные гипсовые изделия содержат много химически несвязанной воды, снижающей их прочность. Для повышения прочности изделия сушат при температуре 60…70 °С.

Водостойкость гипсовых изделий низкая – коэффициент размягчения составляет 0,3…0,5 в зависимости от водогипсового отношения. Вследствие высокой пористости, **гипсовые изделия гигроскопичны.** В результате сорбционного увлажнения прочность изделий может снижаться на 30…40 %. Водостойкость повышают гидрофобизирующие добавки и пропитки, интенсивное уплотнение.

К недостаткам гипсовых вяжущих веществ также относят **ползучесть влажного гипсового камня и коррозию стальной арматуры** в гипсовых изделиях.

Гипсовые изделия **огнестойки**: они достаточно медленно прогреваются и разрушаются через 6…8 часов после начала нагрева, что позволяет устраивать, например, гипсокартонные перегородки с пределом огнестойкости до EI 240.

В **условном обозначении** гипсового вяжущего отражены нормируемые показатели качества (рисунок 1).

Рис. 1. Нормируемые показатели качества

Применение

Гипсовые вяжущие вещества применяются для производства сухих строительных смесей различного назначения (штукатурных, шпаклевочных, для наливных полов и др.); гипсокартонных и гипсоволокнистых листов, звукопоглощающих перфорированных плит и панелей, плит для модульных потолков и др.; гипсобетонных изделий, гипсовых пазогребневых плит для перегородок, тонкостенных изделий (вентиляционные короба и др.); гипсовых архитектурных деталей; гипсоцементно-пуццолановых вяжущих.

1.4. Жидкое стекло

Жидкое стекло – воздушное вяжущее вещество, представляющее собой коллоидный водный раствор силиката натрия или калия при содержании воды 50…70 %. Жидкое стекло представляет собой вязкую жидкость желтого или коричневого цвета с плотностью 1300…1500 кг/м^3.

Производство. Жидкое стекло получают путем растворения силикат-глыбы, применяя для этого обработку ее кусков паром под давлением 0,6…0,8 МПа в автоклаве. При нормальных условиях силикат-глыба в воде нерастворима. Силикат-глыба представляет собой твердые куски застывшего стеклянного расплава, который варят, как и обычное стекло, в стеклоплавильных печах при температуре 1300…1400 °С из кварцевого песка и соды.

Химический состав жидкого стекла обычно выражается формулой: $R_2O \cdot mSiO_2$, где R – это натрий (Na) или калий (К); m – модуль жидкого стекла: у натриевого стекла m = 2,5…3, у калиевого m = 3…4. Чем выше модуль жидкого стекла, тем выше его клеящие свойства.

Твердение. Жидкое стекло может затвердевать только на воздухе. Силикаты натрия и калия в воде подвергаются гидролизу:

$$Na_2O \cdot SiO_2 + 3H_2O \rightarrow 2NaOH + SiO_2 \cdot 2H_2O.$$

Сущность процесса твердения жидкого стекла заключается в испарении жидкой фазы, повышении концентрации геля кремнекислоты $SiO_2 \cdot 2H_2O$, который и обладает вяжущими свойствами.

Существенно ускоряет выпадение геля кремнекислоты и гидролиз жидкого стекла, а соответственно, и процесс твердения добавка кремнефтористого натрия Na_2SiF_6:

$$2(Na_2O \cdot SiO_2) + Na_2SiF_6 + 6H_2O \rightarrow 6NaF + 3(SiO_2 \cdot 2H_2O).$$

Изделия на основе жидкого стекла характеризуются низкой водостойкостью, поскольку свободные гидроксид натрия и фтористый натрий при действии на них воды выщелачиваются (вымываются). Существуют различные способы повышения водостойкости жидкого стекла, в том числе использование в качестве отвердителей портландцемента, гипса, каустического магнезита; введение химически активных добавок – CaO, $Ca(OH)_2$, диатомита, микрокремнезема и др., способствующих образованию низкоосновных гидросиликатов кальция – прочных и водонерастворимых; обработка поверхности изделий разбавленной соляной или серной кислотой, растворами хлористого кальция или магния, гидрофобизирующими составами; введение гидрофобизаторов; введение модифицирующих добавок и другие способы.

Применение. Жидкое стекло применяют для изготовления кислотоупорного кварцевого цемента, кислотоупорных и жароупорных бетонов, легких бесцементных бетонов, гидроизоляционных и теплоизоляционных материалов, клеевых композиций, укрепления грунтов и т.д.

Кислотоупорный кварцевый цемент применяют в конструкциях на химическом производстве, подвергающихся действию кислых сред. Представляет собой порошкообразный материал, получаемый путем совместного помола кварцевого песка и кремнефтористого натрия (либо смешением раздельно измельченных компонентов). Вместо кварцевого песка могут применяться другие кислотостойкие материалы (бештаунит, андезит, базальт). Содержание Na_2SiF_6 должно находиться в пределах 10…15 % массы жидкого стекла. Кислотоупорный цемент вяжущими свойствами не обладает, его затворяют водным раствором

жидкого стекла (в количестве 25…30 % по массе песка), которое и является вяжущим. При оптимальном подборе состава кислотоупорного цемента и зернового состава заполнителей получают кислотоупорные бетоны с прочностью до 30…40 МПа.

1.5. Магнезиальные вяжущие вещества

Магнезиальные вяжущие вещества (называемые также магнезиальным цементом, цементом Сореля) – воздушные вяжущие вещества, основной составляющей которых является оксид магния. К ним относят каустический магнезит и каустический доломит.

Предложены французским инженером и физиком Станисласом Сорелем в 1866 г.

Сырьем для производства магнезиальных вяжущих являются магнезит ($MgCO_3$), реже – доломит ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$).

Производство магнезиальных вяжущих заключается в добыче сырья, его дроблении, умеренном обжиге (при температуре 700…800 °С) и последующем измельчении:

$$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2\uparrow.$$

Твердение. При затворении водой оксид магния гидратируется очень медленно:

$$MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2.$$

Поэтому магнезиальные вяжущие вещества чаще всего затворяют водным раствором хлорида магния (реже – сульфата магния). При этом наряду с гидратацией оксида магния происходит образование гидрохлорида магния $3MgO \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$, обеспечивающего быстрый рост прочности. Соотношение между компонентами по массе при затворении хлористым магнием принимают: MgO – 62…67 %, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ – 33…38 %.

Показатели качества и свойства. По **показателям химического состава** каустический магнезит должен отвечать следующим требованиям: содержание MgO не менее 75 %, CaO – не более 4,5 %, SiO_2 – не более 3,5 %. **Степень дисперсности** должна быть такой, чтобы проход пробы вяжущего через сетку с ячейками размером в свету 2 мм составлял 100 %. **Истинная плотность** 3100…3400 кг/м^3. **Сроки схватывания:** начало – не ранее 20 мин, конец – не позднее 6 ч. Сроки схватывания определяются путем погружения иглы прибора Вика в тесто нормальной густо-

ты. Густота теста, приготовленного затворением магнезиального вяжущего водным раствором хлорида магния, считается нормальной, если пестик прибора Вика через 10 с погружается в тесто на 4…10 мм. Начало схватывания – время, прошедшее от момента затворения вяжущего до того момента, когда игла впервые не будет доходить до пластинки на 1…2 мм. Конец схватывания – время от момента затворения вяжущего до момента, когда игла впервые опустится в тесто не более чем на 1 мм.

Предел прочности при растяжении образцов-восьмерок длиной 78 мм, толщиной 22,5 мм, шириной шейки 22,5 мм, изготовленных из теста нормальной густоты, и твердевших на воздухе (24±2) ч, должен составлять не менее 1,5 МПа.

Каустический магнезит является **быстротвердеющим вяжущим** (прочность через сутки – 35...50 %, через 7 суток – 60…90 % наибольшего значения прочности), характеризуется **высокой прочностью** – 40…60 МПа. Образцы для определения предела прочности изготавливают из жесткого трамбованного раствора, состоящего из вяжущего (3 части), опилок (1 часть) и затворенного водным раствором хлористого магния, и испытывают в возрасте 28 суток воздушного твердения. Каустический магнезит **хорошо сцепляется с древесиной.** Изделия, изготовленные на каустическом магнезите, характеризуются **высокой гигроскопичностью, низкой водостойкостью,** при повышенном содержании в них хлористого магния **могут давать высолы.**

Применяются для устройства ксилолитовых полов (основной наполнитель – древесные опилки, такие полы малотеплопроводны, мало истираются, негорючи), производства стекломагниевых листов, элементов декора, фибролита, абразивных материалов (точильные камни, круги).

1.6. Портландцемент

Общие сведения

Портландцемент – гидравлическое вяжущее вещество, получаемое совместным тонким измельчением портландцементного клинкера, в составе которого преобладают силикаты кальция – 70…80 %, с добавкой природного гипса (3…5 %). По **внешнему виду** портландцемент представляет собой тонкодисперсный порошок темно-серого или зеленовато-серого цвета.

Портландцементный клинкер – это зернистый материал (размер гранул 10…40 мм), получаемый обжигом до спекания (при температуре до 1450 °С) тщательно подобранной сырьевой смеси. Добавка гипса вводится для регулирования сроков схватывания портландцемента.

Изобретение портландцемента связано с именами английского каменщика Джозефа Аспдина, получившего 21.10.1824 г. патент на портландцемент, и русского строителя Егора Герасимовича Челиева, который изобрел цемент, наиболее схожий с современным портландцементом, и описал его в своей книге, изданной в 1825 г.

Название портландцемента происходит от англ. *Portland* – название полуострова на юге Великобритании, где добывалось сырье для производства портландцемента.

Сырьем для производства портландцемента служат:

– известняки с высоким содержанием кальцита $CaCO_3$ (мел, плотный известняк и др.);

– глинистые породы (глины, глинистые сланцы), основной составляющей которых являются водные алюмосиликаты с общей формулой $Al_2O_3 \cdot nSiO_2 \cdot mH_2O$;

– мергели – горные породы, представляющие собой природную смесь известняков и глин;

– отходы промышленности, сходные по составу с природным сырьем (вскрышные породы, доменные шлаки, нефелиновый шлам, золы ТЭС и проч.);

– корректирующие добавки, используемые для обеспечения требуемого химического состава сырьевой смеси (пиритные огарки, трепел, опока и др.).

Соотношение между карбонатной и глинистой составляющими сырьевой смеси 3:1 (75 % известняка и 25 % глины).

Производство портландцемента – технологически сложный и энергоемкий процесс, который можно разделить на две основные стадии: первая – производство клинкера, вторая – помол клинкера совместно с гипсом, а в ряде случаев и со специальными добавками.

Производство клинкера может осуществляться сухим, мокрым и комбинированным способом. **Сухой способ** заключается в приготовлении сырьевой муки (в виде порошка) из сухих или

предварительно высушенных компонентов с остаточной влажностью 1…2 %. Сухой способ в 1,5…2 раза менее энергоемок, чем мокрый. При **мокром способе** сырьевые материалы измельчаются и смешиваются в присутствии воды, поэтому смесь получается в виде вязкотекучей массы – шлама (от нем. schlamm – грязь) с влажностью 35…45 %. Это наиболее энергоемкий способ. **Комбинированный способ** заключается в том, что приготовленный шлам до поступления в печь обезвоживается на фильтрах до влажности 16…18 %. Энергоемкость производства в целом остается высокой, однако, данный способ позволяет на 20…30 % снизить расход топлива по сравнению с мокрым способом.

Обжиг сырьевой смеси осуществляется во вращающихся печах, работающих по принципу противотока (сырье движется навстречу раскаленным продуктам сгорания топлива). Печь диаметром 5…7 м имеет небольшой наклон (3–5°) и вращается со скоростью 1–2 об/мин. При мокром способе производства длина печи достигает 185–230 м. Двигаясь от верхнего конца печи (холодного) к нижнему (горячему, со стороны которого подается топливо), сырье проходит различные температурные зоны, в каждой из которых происходят физико-химические превращения, в результате чего и получается цементный клинкер.

После испарения свободной воды, выгорания органических примесей и удаления химически связанной воды из глинистых минералов происходит декарбонизация углекислого кальция (900…1100 °С) с образованием большого количества CaO и одновременно разложение дегидратированных глинистых минералов на оксиды Al_2O_3, SiO_2, Fe_2O_3. Образовавшиеся оксиды вступают в химическое взаимодействие с образованием новых минералов $3CaO \cdot Al_2O_3$, $CaO \cdot Al_2O_3$ и частично $2CaO \cdot SiO_2$.

При температуре 1100…1250 °С происходят твердофазовые реакции образования минералов $3CaO \cdot Al_2O_3$, $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ и $2CaO \cdot SiO_2$. Наивысшего значения (1300–1450°С) температура обжига достигает в зоне спекания, где происходит частичное плавление сырья и образуется главный минерал клинкера – алит $3CaO \cdot SiO_2$. В последней зоне печи клинкер охлаждается до 1000 °С путем вдувания холодного воздуха, а при выходе из печи поступает в холодильник, где интенсивно охлаждается холодным воздухом.

Помол клинкера с добавкой гипса осуществляется в многокамерных шаровых мельницах при помощи загруженных в бара-

бан мелющих тел – шаров (при грубом помоле) или цилиндров (при мелком помоле).

Химический состав клинкера выражают содержанием оксидов в % по массе (таблица 6).

Таблица 6

Химический состав клинкера портландцемента

Оксид	Содержание, %	Оксид	Содержание, %
CaO	63…66	Al_2O_3	4…8
SiO_2	21…24	Fe_2O_3	2…4

В небольших количествах в клинкере содержатся MgO, SO_3, Na_2O, K_2O, TiO_2, Cr_2O_3, P_2O_5.

Содержание в клинкере MgO и свободного (не связанного в основные клинкерные минералы) CaO ограничивается, так как они могут стать причиной неравномерного изменения объема цемента при твердении. Свободного CaO в клинкере должно быть не более 1 %, MgO – не более 5 %.

Суммарное содержание щелочных оксидов (Na_2O и K_2O) не должно превышать 0,6 %, так как они могут явиться причиной коррозии бетона и существенно замедлять схватывание портландцемента.

Минеральный состав клинкера:

– Трехкальциевый силикат (алит) – $3CaO \cdot SiO_2$ (C_3S) – 45…60 % – основной минерал клинкера, определяет скорость твердения, прочность и другие свойства портландцемента;

– Двухкальциевый силикат (белит) – $2CaO \cdot SiO_2$ (C_2S) – 20…30 % – медленно твердеет, но достигает высокой прочности при длительных сроках твердения;

– Трехкальциевый алюминат $3CaO \cdot Al_2O_3$ (C_3A) – 4…12 % – быстро гидратируется и твердеет, но конечная прочность его небольшая; является причиной сульфатной коррозии цементного камня;

– Четырехкальциевый алюмоферрит $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ (C_4AF) – 10…20 % – по скорости твердения занимает промежуточное положение между C_3S и C_2S.

Фазовый состав клинкера представлен кристаллической фазой в виде клинкерных минералов (85…95 %) и аморфной фазой в виде клинкерного стекла (5…15 %).

Вещественный состав портландцемента характеризуется процентным содержанием клинкера, гипса, видом и количеством вводимых добавок.

Введение в цемент при помоле минеральных и органических добавок позволяет направленно изменять свойства вяжущего, экономить клинкер, уменьшать расход цемента в бетоне. Добавки обладают разным механизмом действия: при твердении цемента могут вступать в химическое взаимодействие с продуктами гидратации цемента (активные минеральные добавки), влиять на пластичность бетонных и растворных смесей (добавки поверхностно-активных веществ), выступать в роли наполнителей, снижающих активность цемента и т.п.

Добавки–наполнители (тонкомолотые магматические горные породы, известняк, кварцевый песок, топливные шлаки и золы) вводятся для снижения активности вяжущего, способствуют снижению тепловыделения цемента при твердении.

Активные минеральные добавки (АМД) – природные (осадочного происхождения – диатомиты, трепелы, опоки, глиежи; вулканического происхождения – вулканический пепел, вулканический туф, пемза, трасс, витрофир) или искусственные (золаунос, микрокремнезем, топливные шлаки) вещества, которые вводятся в цемент для связывания водорастворимого портландита – $Ca(OH)_2$, являющегося одним из продуктов гидратации алита и белита, в малорастворимые соединения, повышая стойкость бетона к коррозии выщелачивания (вымыванию портландита из цементного камня), его водостойкость, сульфатостойкость и эксплуатационные свойства.

Твердение портландцемента происходит благодаря сложным физико-химическим процессам взаимодействия клинкерных минералов и гипса с водой. Сразу после затворения начинаются химические реакции. В результате физико-химических процессов на поверхности твердых частиц и в жидкой фазе формируются продукты гидратации в виде новообразований различной закристаллизованности. На их смачивание затрачивается вода, поэтому система постепенно теряет подвижность, загустевает, переходит в твердое состояние, наступает начало схватывания и дальнейшее твердение. Традиционно процессы твердения портландцемента принято описывать теорией Байкова А.А.

При взаимодействии с водой минералов – силикатов происходит одновременно их гидролиз (разложение водой) и гидратация (присоединение воды) с образованием гидросиликата и гидроксида кальция (портландита):

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2;$$

$$2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2.$$

Гидросиликаты кальция – основной продукт твердения портландцемента – практически нерастворимы в воде. Они выделяются из раствора в виде геля, который со временем кристаллизуется. Этот гель пронизывают, укрепляя его, кристаллы $Ca(OH)_2$. Содержание портландита в продуктах гидратации портландцемента может составлять до 15…20 %. Другие продукты взаимодействия клинкера с водой также участвуют в формировании структуры цементного камня и влияют на его свойства.

Гидратация трехкальциевого алюмината протекает крайне быстро с образованием крупных кристаллов гидроалюмината кальция и приводит к утрате пластичности цементного теста:

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O.$$

Для замедления схватывания портландцемента при помоле клинкера добавляют 3…5 % двуводного гипса. Гипс реагирует с трехкальциевым алюминатом и связывает его в практически нерастворимый гидросульфоалюминат кальция (эттрингит) в начале гидратации портландцемента:

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 3(CaSO_4 \cdot 2H_2O) + 26H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32\ H_2O.$$

Эттрингит выделяется в виде пленок на поверхности частиц C_3A, затрудняет доступ к ним воды и, соответственно, замедляет их гидратацию и отодвигает начало схватывания цемента. Кроме того, роль добавки гипса состоит в улучшение свойств цементного камня (прочности, морозостойкости) за счет уплотнения структуры, связанного с увеличением объема эттрингита (в 2…2,5 раза больший объем по сравнению с объемом исходных реагирующих веществ) в еще не затвердевшей системе.

Четырехкальциевый алюмоферрит при взаимодействии с водой образует гидроалюминат и гидроферрит кальция:

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + mH_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot nH_2O.$$

Гидроалюминат связывается добавкой природного гипса, а гидроферрит входит в состав цементного геля.

Реакции гидратации клинкерных минералов экзотермические. По интенсивности тепловыделения минералы можно расположить в следующей последовательности: C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S. Интенсивность тепловыделения портландцемента зависит от минерального состава и тонкости помола.

Тепловыделение играет положительную роль при бетонировании конструкций в зимних условиях, т.к. позволяет применять метод термоса (твердение бетона в утепленной опалубке), и отрицательную – при бетонировании в жаркую, сухую погоду, особенно при бетонировании массивных конструкций. Вследствие саморазогрева бетона возможно образование в конструкции усадочных трещин.

Выделяющийся при гидратации портландцемента портландит – $Ca(OH)_2$ создает в твердеющем цементе щелочную среду (pH = 12…12,5), что предотвращает коррозию стальной арматуры в бетоне (порог коррозии арматурной стали pH = 11,8). В то же время водорастворимый $Ca(OH)_2$ является «слабым звеном» с точки зрения коррозии цементного камня в бетоне.

При затворении портландцемента избыток воды нежелателен. Цемент в состоянии химически связать строго определенное количество воды – максимально 25…30 % массы цемента, фактически к возрасту 28 суток это значение составляет 15 %. Лишняя вода образует в цементном камне капиллярные поры, что ведет к снижению его прочности. Поэтому в современной технологии бетона практически всегда используют пластификаторы – поверхностно-активные вещества, позволяющие при сохранении заданной подвижности бетонной смеси снизить ее водопотребность на 25…40 %.

Коррозия цементного камня

Коррозия цементного камня в бетоне происходит при действии на него агрессивных жидкостей и газов. Наиболее уязвимыми с точки зрения коррозии продуктами гидратации портландцемента являются портландит $Ca(OH)_2$ и гидроалюминат кальция $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$. Коррозионные процессы в цементном камне в зависимости от механизма протекания принято разделять на 3 группы (по Москвину В.М.):

Коррозия I вида – растворение составляющих цементного камня, вымывание гидроксида кальция (коррозия выщелачивания). Гидроксид кальция $Ca(OH)_2$ является водорастворимым соединением, а его содержание составляет до 15…20 % массы всех продуктов гидратации портландцемента. Его вымывание происходит весьма интенсивно при действии на цементный камень мягких вод. После вымывания свободного гидроксида кальция начинается разложение гидросиликатов кальция $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$. Выщелачивание портландита в количестве 15…30 % от общего содержания может привести к снижению прочности цементного камня на 40...50 % и более. Основным методом борьбы с коррозией выщелачивания является введение в портландцемент активных минеральных добавок, связывающих водорастворимый портландит в низкоосновные водонерастворимые гидросиликаты кальция. Повысить стойкость бетона к коррозии выщелачивания можно также путем снижения проницаемости бетона за счет использования жестких бетонных смесей, применения химических добавок – пластификаторов, гидрофобизаторов и др.

Коррозия II вида – образование легкорастворимых солей при взаимодействии составляющих цементного камня с агрессивными веществами и их вымывание. К данному виду коррозии относятся:

– Кислотная коррозия – проявляется при действии на цементный камень растворов кислот с pH<7. В зависимости от pH коррозия может протекать достаточно интенсивно. Отрицательное воздействие кислой среды на бетон становится заметным при pH ≤ 6,5, а на особо плотный бетон – при pH ≤ 4,5. Кислота взаимодействует с портландитом с образованием растворимых солей:

$$Ca(OH)_2 + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + 2H_2O;$$

$$Ca(OH)_2 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O.$$

Кислоты могут взаимодействовать также с гидросиликатами кальция с образованием водорастворимых солей и бессвязных аморфных масс:

$$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + mHCl \rightarrow 3CaCl_2 + 2SiO_2 \cdot aq + nH_2O.$$

Разновидностью кислотной коррозии является углекислотная коррозия, которая развивается при действии на цементный ка-

мень воды, содержащей свободный диоксид углерода в виде слабой угольной кислоты. Вначале реакция протекает между портландитом и углекислотой:

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O.$$

Затем образуется гидрокарбонат кальция:

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \leftrightarrow Ca(HCO_3)_2.$$

Защитить бетон от действия сильных кислот достаточно трудно, поэтому для бетонов, предназначенных для эксплуатации в агрессивных кислых средах, используют специальные кислотостойкие цементы и кислотостойкие заполнители.

– Магнезиальная коррозия. Соли магния встречаются в грунтовых водах и в большом количестве содержатся в морской воде. В результате магнезиальной коррозии образуются растворимые соли, вымываемые из бетона:

$$Ca(OH)_2 + MgCl_2 \rightarrow CaCl_2 + Mg(OH)_2;$$

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + Mg(OH)_2.$$

– Коррозия под действием минеральных удобрений, наиболее опасными из которых для цементного камня являются аммиачная селитра NH_4NO_3 и сульфат аммония $(NH_4)_2SO_4$, происходит по схеме:

$$Ca(OH)_2 + 2NH_4NO_3 + 2H_2O \rightarrow Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O + 2NH_3\uparrow.$$

Основной способ защиты от коррозии II вида – снижение проницаемости бетона, использование защитных покрытий, облицовок.

Коррозия III вида – образование в порах цементного камня веществ с увеличением объема, что вызывает появление в цементном камне внутренних напряжений, приводящих к его растрескиванию.

К коррозии III вида относится, в первую очередь, сульфоалюминатная коррозия, которая происходит при действии на гидроалюминат кальция воды, содержащей сульфатные ионы:

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 3CaSO_4 + 25\ldots26H_2O \rightarrow$$

$$\rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31\ldots32H_2O.$$

В результате данной реакции образуется эттрингит, который занимает в 2-2,5 раза больший объем по сравнению с исходными компонентами реакции. Как было отмечено выше, в процессе твердения портландцемента образование эттрингита играет положительную роль, поскольку его игловидные кристаллы уплотняют структуру и упрочняют цементный камень. Образование эттрингита в затвердевшем цементном камне приводит к появлению внутренних растягивающих напряжений и растрескиванию цементного камня (в данном случае эттрингит иногда называют «цементной бациллой»). В железобетонных конструкциях прежде всего растрескивается защитный слой бетона, после чего начинается коррозия стальной арматуры. Возможность сульфоалюминатной коррозии всегда необходимо учитывать при строительстве морских сооружений. Основным способом борьбы с сульфоалюминатной коррозией является использование сульфатостойких цементов.

К коррозии III вида относится также щелочная коррозия, которая может происходить под влиянием двух факторов. Первый фактор – непосредственное воздействие щелочи на цементный камень. В этом случае после высыхания насыщенного щелочью бетона, под влиянием углекислого газа в порах бетона образуется сода и поташ, которые, кристаллизуясь, увеличиваются в объеме и разрушают цементный камень. Второй фактор – взаимодействие щелочей цементного камня с реакционноспособными примесями, содержащимися в заполнителях, в особенности, в песке (например, опал, халцедон, вулканическое стекло). Данный вид коррозии может проявляться в появлении трещин, шелушении и вспучивании поверхности бетона.

Показатели качества и свойства

В настоящее время в Российской Федерации параллельно действуют три группы стандартов, в которых установлены технические условия на цементы и методы их испытания. Первая группа стандартов была разработана в СССР в 70–80-х гг. XX в, вторая сформировалась относительно недавно и практически полностью заимствована из европейских стандартов EN 196 и EN 197 (таблица 7), третья группа – стандарт, полностью идентичный EN 197.

Таблица 7

Стандарты РФ, регламентирующие показатели качества и методы испытания портландцемента

Группа стандартов	«Старая» нормативная база, разработанная в СССР	«Новая» нормативная база, гармонизированная с EN (идентичная EN)
Технические условия	ГОСТ 10178–85	ГОСТ 30515–2013 ГОСТ 31108–2020 (ГОСТ Р 57293-2016/ EN 197-1:2011)
Методы испытания	ГОСТ 310.1 – ГОСТ 310.6	ГОСТ 30744–2001

Основу классификации портландцементов по видам и типам составляет их **вещественный состав** (таблица 8).

Таблица 8

Классификация цементов на основе портландцементного клинкера по вещественному составу

№ п/п	Виды цементов (по «старым» стандартам)	Типы цементов (по «новым» стандартам)
1	Портландцемент – ПЦ–Д0* (без минеральных добавок)	ЦЕМ I – портландцемент
2	Портландцемент с добавками – ПЦ–Д5, ПЦ–Д20* (с АМД** не более 20 %)	ЦЕМ II – портландцемент с минеральными добавками (с АМД** 6…35 %, с микрокремнеземом – 6…10 %)
3	Шлакопортландцемент – ШПЦ (с добавками гранулированного шлака 21…80 %)	ЦЕМ III – шлакопортландцемент (с добавками гранулированного шлака 36…95 %)
4	Пуццолановый портландцемент – ППЦ (с кислыми АМД 21…40 %) – исключен из ГОСТ 22266 с 01.01.2015 г.	ЦЕМ IV – пуццолановый цемент (с кислыми АМД 11…55 %)
5	Аналогов нет	ЦЕМ V – композиционный цемент (содержит смесь минеральных добавок 36…80 %)

* Наличие минеральных добавок обозначается буквой «Д»: Д0, Д5, Д20, цифра обозначает количество добавки (по массе);

** АМД – активная минеральная добавка.

Цементы типа II в зависимости от содержания минеральных добавок делятся на подтипы А с содержанием минеральных добавок 6…20 % и В – 21…35 % (см. таблицу 9).

Таблица 9

Вещественный состав цементов по ГОСТ 31108–2020

Тип цемента	Наименование цемента	Сокращенное обозначение цемента	Вещественный состав цемента, % массы								
			Основные компоненты								Вспомогательные компоненты
			Портландцементный клинкер	Шлак	Пуццолана	Зола-уноса	Глиеж	Микрокремнезем	Обожженный сланец	Известняк	
			Кл	Ш	П	З	Г	Мк	Сл	И	
ЦЕМ I	Портландцемент	ЦЕМ I	95-100	–	–	–	–	–	–	–	0-5
ЦЕМ II	Портландцемент с минеральными добавками:										
	шлаком	ЦЕМ II/А-Ш	80-94	6-20	–	–	–	–	–	–	0-5
		ЦЕМ II/В-Ш	65-79	21-35	–	–	–	–	–	–	0-5
	пуццоланой	ЦЕМ II/А-П	80-94	–	6-20	–	–	–	–	–	0-5
		ЦЕМ II/В-П	65-79	–	21-35	–	–	–	–	–	0-5
	золой-уноса	ЦЕМ II/А-З	80-94	–	–	6-20	–	–	–	–	0-5
		ЦЕМ II/В-З	65-79	–	–	21-35	–	–	–	–	0-5
	глиежем	ЦЕМ II/А-Г	80-94	–	–	–	6-20	–	–	–	0-5
		ЦЕМ II/В-Г	65-79	–	–	–	21-35	–	–	–	0-5
	микрокремнеземом	ЦЕМ II/А-Мк	90-94	–	–	–	–	6-10	–	–	0-5
	обожженным сланцем	ЦЕМ II/А-Сл	80-94	–	–	–	–	–	6-20	–	0-5
		ЦЕМ II/В-Сл	65-79	–	–	–	–	–	21-35	–	0-5
	известняком	ЦЕМ II/А-И	80-94	–	–	–	–	–	–	6-20	0-5
		ЦЕМ II/В-И	65-79	–	–	–	–	–	–	21-35	0-5
	композиционный портландцемент	ЦЕМ II/А-К	80-88	12-20							0-5
		ЦЕМ II/В-К	65-79	21-35							0-5
ЦЕМ III	Шлакопортландцемент	ЦЕМ III/А	35-64	36-65	–	–	–	–	–	–	0-5
		ЦЕМ III/В	20-34	66-80	–	–	–	–	–	–	0-5
		ЦЕМ III/С	5-19	81-95	–	–	–	–	–	–	0-5
ЦЕМ IV	Пуццолановый цемент	ЦЕМ IV/А	65-89	–	11-35				–	–	0-5
		ЦЕМ IV/В	45-64	–	36-55				–	–	0-5
ЦЕМ V	Композиционный цемент	ЦЕМ V/А	40-64	18-30	18-30			–	–	–	0-5
		ЦЕМ V/В	20-38	31-49	31-49			–	–	–	0-5

ГОСТ 30515–2013 **нормируемые показатели качества** общестроительных цементов на основе портландцементного клинкера подразделяет на обязательные и рекомендуемые. К **обязательным** относят: прочность, вещественный состав, равномерность изменения объема, начало схватывания, содержание в клинкере оксида магния (MgO), оксида серы (VI) – SO_3, хлор-иона (Cl^-), удельную эффективную активность естественных радионуклидов. К **рекомендуемым** показателям относят: конец схватывания, тонкость помола, содержание в клинкере свободного оксида кальция. Основные показатели качества по «старым» и «новым» стандартам приведены в таблице 10.

Таблица 10

Показатели качества портландцемента

Наименование показателя	Значение показателя	
	ГОСТ 10178–85	ГОСТ 31108–2020
Прочность	Установлены марки по прочности (кгс/см^2): 300; 400; 500; 550; 600.	Установлены классы по прочности (МПа): 32,5М; 32,5Н; 32,5Б; 42,5М; 42,5Н; 42,5Б; 52,5М; 52,5Н; 52,5Б
Вещественный состав	См. табл. 8.	См. табл. 8–9
Сроки схватывания: начало, мин, не ранее	45	45, 60, 75 в зависимости от класса прочности цемента (см. табл. 11)
конец, ч, не позднее	10	Не нормируется
Тонкость помола	При просеивании пробы через сито № 008 должно проходить не менее 85 % массы пробы	Не нормируется
Равномерность изменения объема	Визуальная оценка по результатам кипячения в течение 3-х часов лепешек, изготовленных и цементного теста нормальной густоты	Инструментальная оценка при помощи колец Ле-Шателье (расхождение индикаторных игл не более 10 мм)
Массовая доля SO_3, %	Не менее 1,0…1,5, не более 3,5…4,0 в зависимости от марки и вида цемента	Не более 3,5…4,0 в зависимости от класса цемента
Массовая доля MgO, %	Не более 5 %	Не более 5 %
Содержание хлор-иона Cl^-, %	Не нормируется	Не более 0,1

Истинная плотность портландцемента 3100…3200 кг/м^3. **Насыпная плотность** в рыхлом состоянии – 900…1100 кг/м^3, в уплотненном состоянии – 1400…1700 кг/м^3, в среднем для расчетов принимают насыпную плотность 1300 кг/м^3.

Тонкость помола цемента определяет скорость твердения и прочность цементного камня, а также влияет на интенсивность тепловыделения. Тонкость помола – важнейший рычаг регулирования активности цемента. По ГОСТ 31108-2020 она должна быть такой, чтобы через сито № 008 с размером ячеек 80 мкм проходило не менее 85 % массы просеиваемой пробы. При этом удельная поверхность составляет $S_{уд}$=2500…3000 см^2/г (или 250…300 м^2/кг). ГОСТ 31108–2020 требований к тонкости помола не устанавливает.

Водопотребность портландцемента (нормальная густота) характеризуется количеством воды, % массы цемента, необходимым для получения цементного теста нормальной густоты. В среднем она составляет 24…28 %. При введении активных минеральных добавок водопотребность цемента повышается и может достигать 32…37 %. Нормальную густоту находят подбором и определяют по глубине погружения в цементное тесто пестика прибора Вика при стандартном испытании.

Сроки схватывания цементов (начало и конец схватывания) определяют с помощью прибора Вика на цементном тесте нормальной густоты. На сроки схватывания существенно влияет минеральный состав цемента, его водопотребность и тонкость помола. На производстве сроки схватывания регулируют использованием добавок – ускорителей и замедлителей схватывания.

Равномерность изменения объема при твердении цемента в соответствии с ГОСТ 310.3–76 определяется путем визуальной оценки состояния образцов-лепешек, изготовленных из цементного теста нормальной густоты, после испытания кипячением в течение 3-х часов. ГОСТ 30744–2001 предполагает инструментальную оценку данного показателя при помощи колец Ле-Шателье. К неравномерному изменению объема приводят местные деформации, вызываемые расширением свободных CaO и MgO при их взаимодействии с водой.

Класс по прочности – основной показатель качества портландцемента. Прочность контролируется испытанием на изгиб и

сжатие стандартных образцов–балочек размером 4×4×16 см, изготовленных из цементно-песчаного раствора, через 28 суток твердения. В результате определяется **активность цемента** – фактическая прочность на сжатие образцов цементно-песчаного раствора. На основании активности цемента устанавливается его класс по ГОСТ 31108-2020 (таблица 11).

Таблица 11

Требования к свойствам цементов по ГОСТ 31108–2020

Класс прочности цемента	Предел прочности на сжатие, МПа, в возрасте				Начало схватывания, мин, не ранее
	2 сут, не менее	7 сут, не менее	28 сут		
			не менее	не более	
32,5М	–	12	32,5	52,5	75
32,5Н	–	16			
32,5Б	10	–			
42,5М	–	16	42,5	62,5	60
42,5Н	10	–			
42,5Б	20	–			
52,5М	10	–	52,5	–	45
52,5Н	20	–			
52,5Б	30	–			

ГОСТ 31108–2020 предусматривает разделение цементов по классам прочности. Цементы всех классов подразделяют по скорости твердения на подклассы: медленно твердеющие (индекс М), нормально твердеющие (индекс Н) и быстротвердеющие (индекс Б). Числовое значение класса выражено в МПа. Для цементов любого класса в обязательном порядке должна быть обеспечена прочность в промежуточном возрасте (2 или 7 суток).

При назначении класса цемента по прочности учитывается только прочность цемента при сжатии, прочность при изгибе значения не имеет.

Методики определения активности портландцемента для установления марки или класса отличаются. Основные отличия заключаются в различном водоцементном отношении раствора, использовании песков с разным гранулометрическим составом, способе уплотнения раствора. В среднем активность цемента, определенная по ГОСТ 30744–2001, составляет 77…98 % (в зависимости от марки цемента) активности, определенной по ГОСТ 310.4–81.

Согласно ГОСТ 31108-2020, **условное обозначение** цемента должно состоять из наименования вида цемента, марки по прочности, обозначения максимального содержания добавок в цементе, обозначения быстротвердеющего цемента, номера стандарта. Пример условного обозначения портландцемента марки 500, бездобавочного:

ПЦ 500–Д0 ГОСТ 31108–2020.

Согласно ГОСТ 31108–2020, условное обозначение цементов должно включать: наименование цемента, сокращенное обозначение цемента, включающее обозначение типа и подтипа цемента и вида добавки, класс прочности, обозначение подкласса, номер стандарта. Пример условного обозначения портландцемента класса 42,5 быстротвердеющего, бездобавочного:

Портландцемент ЦЕМ I 42,5Б ГОСТ 31108–2020.

Применение

Портландцемент – основной материал современной строительной индустрии. Портландцемент и его разновидности применяются при возведении монолитных железобетонных конструкций практически любого назначения, для производства сборных железобетонных конструкций и изделий, для изготовления строительных растворов и сухих строительных смесей, для производства специальных видов цемента, а также при изготовлении ряда других строительных материалов.

1.7. Специальные виды портландцемента

Для получения цементов с заданными специальными свойствами применяют следующие основные способы:

1. **Регулирование минерального состава** и структуры цементного клинкера – оказывает решающее влияние на все свойства цемента. Мероприятия по регулированию минерального состава клинкера осуществляются на этапе проектирования и корректировки состава сырьевой смеси, структура обеспечивается определенным режимом обжига и скоростью охлаждения клинкера.
2. **Изменение вещественного состава** цемента – введение в цемент при помоле минеральных и органических добавок, позволяющих направленно изменять свойства вяжущего.

3. **Регулирование тонкости помола** цемента. За счет более тонкого помола увеличивается поверхность раздела фаз, реакции гидратации протекают быстрее, следовательно, цемент быстрее набирает заданную прочность, сокращаются сроки схватывания, увеличивается тепловыделение.

Состав, характерные свойства и области применения некоторых специальных видов портландцемента приведены в таблице 12.

Таблица 12

Специальные виды портландцемента

Вид цемента	Особенности состава	Характерные свойства	Применение
Быстротвердеющий портландцемент	$C_3S+C_3A \geq$ 60…65 %.	Классы 32,5Б, 42,5Б, 52,5Б); $S_{уд}$ = 3500…4000 см^2/г; быстрый рост прочности в раннем возрасте – $R_3 \approx (0,6…0,7)R_{28}$; повышенное тепловыделение; теряет активность при длительном хранении; низкая стойкость к коррозии выщелачивания и сульфоалюминатной коррозии.	Для сборных и монолитных железобетонных конструкций; при зимнем бетонировании; при возведении конструкций в скользящих, катучих и переставных опалубках. Не годится для массивных конструкций и конструкций, подверженных действию мягких и сульфатных вод.
Сульфатостойкий портландцемент (ЦЕМ I СС)	$C_3A \leq 3,5$ %; $Al_2O_3 \leq 5$ %; $MgO \leq 5$ %.	Классы 32,5Н, 32,5Б, 42,5Н, 42,5 Б. Стойкость к сульфатной коррозии; медленный набор прочности в ранние сроки; низкое тепловыделение; повышенная морозостойкость.	Для бетонов конструкций, подверженных сульфатной агрессии и частому попеременному замораживанию-оттаиванию.

Продолжение таблицы 12

Вид цемента	Особенности состава	Характерные свойства	Применение
Пластифицированный портландцемент	При помоле клинкера вводится пластифицирующая добавка (например, лигносульфонаты технические) в количестве 0,15…0,25 % от массы цемента.	Снижение водопотребности бетонных смесей на 10…15 %, следовательно: 1) уменьшается водоцементное отношение В/Ц, повышается плотность, прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, долговечность бетона; 2) при сохранении В/Ц снижается расход цемента на 10…15 %.	При изготовлении всех видов сборного и монолитного железобетона; для гидротехнических сооружений; для бетона дорожных и аэродромных покрытий.
Гидрофобный портландцемент (предложен Хигеровичем М.И.)	При помоле клинкера вводится гидрофобизирующая добавка (асидол, мылонафт) в количестве 0,1…0,2 % от массы цемента.	Имеет пониженную гигроскопичность при хранении – потеря активности составляет не более 6…8 % в год; снижает водопотребность бетонных смесей на 8…10 %, повышает морозостойкость и водонепроницаемость бетона; замедленный рост прочности в ранние сроки.	При длительном хранении и дальних перевозках; для всех видов сборного и монолитного железобетона.
Вяжущее низкой водопотребности (ВНВ)	При помоле клинкера с гипсом вводится суперпластификатор (С–3 и т.п.) в количестве 2…5 % от массы вяжущего и минеральные добавки (для снижения активности) – до 70 % от массы вяжущего.	Повышенная реакционная способность; $S_{уд}$ = 4500…5000 см^2/г; водопотребность 15…18 %; замедление начала схватывания до 6…8 ч; быстрый набор прочности в ранние сроки: R_1=25…30 МПа; высокая прочность R_{28}=70…100 МПа; низкое водопоглощение и повышенная морозостойкость бетона на ВНВ.	Высокопрочные бетоны классов В60…В100; зимнее бетонирование; экстренные ремонтные работы; в составах полимерцементных покрытий полов промышленных зданий. Не годится для массивных конструкций.

Продолжение таблицы 12

Вид цемента	Особенности состава	Характерные свойства	Применение
Белый портландцемент	Сырье: чистый известняк, белые глины; топливо – беззольное (газовое); практически полное отсутствие Fe_2O_3. C_3S – 35…50 %, C_2S – 35…45 %, C_3A – 14…17 %, C_4AF – 0,9…1,4 %.	Белый цвет (три сорта в зависимости от степени белизны); сроки схватывания – начало не ранее 45 мин, конец не позднее 10 ч; тонкость помола – остаток на сите № 008 не более 12 %; повышенная усадка; пониженная коррозионная стойкость и морозостойкость.	Для цветных декоративных портландцементов; для архитектурно-отделочных и декоративных работ.
Портландцемент с минеральными добавками	При помоле клинкера вводятся активные минеральные добавки в количестве: ПЦ–Д5 – до 5 %; ПЦ–Д20 – до 20 %; (ЦЕМ II – см. табл. *9)*	Повышенная стойкость против коррозии выщелачивания и несколько большая по сравнению с бездобавочным портландцементом стойкость к сульфатной агрессии.	Для тех же целей, что и портландцемент; для конструкций, постоянно находящихся во влажных условиях – под землей, в воде, в том числе – в проточной мягкой воде.
Пуццолановый цемент (ЦЕМ IV)	При помоле клинкера вводятся кислые активные минеральные добавки (вулканические туфы, пеплы, пемзы, диатомит, опока, золы ТЭС и др.) в количестве 11…55 %.	Класс 32,5 Н; повышенная стойкость против коррозии выщелачивания и в сульфатных водах; повышенная водопотребность; высокие деформации усадки и набухания, низкая воздухостойкость; низкая морозостойкость – не более 100…150 циклов; медленный рост прочности в ранние сроки; пониженное тепловыделение; высокая водостойкость и водонепроницаемость.	Для подземных и подводных частей сооружений; внутренних частей массивных сооружений (плотин, шлюзов и т.д.), строительства туннелей. Не эффективен в надземных конструкциях, в особенности, эксплуатируемых в жарком сухом климате.

Окончание таблицы 12

Вид цемента	Особенности состава	Характерные свойства	Применение
Шлакопортландцемент (ШПЦ, ЦЕМ III)	При помоле клинкера вводится добавка гранулированного доменного (или электротермофосфорного) шлака в количестве 21…80 % (36…95 % по «новому» ГОСТ 31108–2020 – см. табл. 9)	Классы 32,5, 42,5, 52,5); медленный рост прочности в ранние сроки твердения; низкое тепловыделение (в 2…2,5 раза ниже по сравнению с ПЦ); умеренная водопотребность; стойкость в мягких и сульфатных водах; пониженная морозостойкость; жаростойкость до 600…800 °С; стоимость на 15…20 % ниже, чем у ПЦ.	В гидротехническом строительстве, для возведения массивных конструкций, для жаростойких бетонов, для сборных бетонных и железобетонных конструкций, изготавливаемых с тепловлажностной обработкой.
Цементы для транспортного строительства	$C_3A \leq 7$ %; $C_3S \geq 55$ %; $C_3A + C_4AF \leq 24$ % (для бетона дорожных и аэродромных покрытий); $Na_2O + 0{,}658\ K_2O \leq 0{,}8$ %; содержание органических добавок – не более 0,15 %.	Виды цементов: ЦЕМ I, ЦЕМ II/А–Ш, ЦЕМ II/В–Ш, ЦЕМ III, классы 32,5Н, 32,5Б, 42,5Н, 42,5Б, 52,5Н, 52,5Б; $S_{уд} = 2700…3500$ см^2/г; начало схватывания – не ранее 2 ч; характеризуется повышенной стойкостью к сульфатной коррозии и морозостойкостью, цементы с минеральными добавками – дополнительно повышенной стойкостью к коррозии выщелачивания.	Для бетонов дорожных и аэродромных покрытий (ДП), дорожных оснований (ДО), для изготовления железобетонных изделий и мостовых конструкций (ЖИ), применяемых в транспортном строительстве, для укрепления грунтов (УГ).

1.8. Глиноземистый цемент

Общие сведения

Глиноземистый цемент – быстротвердеющее и высокопрочное гидравлическое вяжущее вещество, получаемое путем тонкого измельчения клинкера, содержащего преимущественно низкоосновные алюминаты кальция.

Сырьем для получения клинкера глиноземистого цемента служат чистые известняки ($CaCO_3$) и породы, содержащие глинозем, например, бокситы ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$).

Производство. Клинкер глиноземистого цемента получают обжигом сырьевой смеси до спекания при температуре 1200–1300 °С либо плавлением в электрических или доменных печах при температуре 1500…1600 °С. Помол клинкера затруднен из-за его высокой твердости. Производство глиноземистого цемента более энергоемко, и с учетом дефицитности сырья (бокситы – ценное сырья для производства алюминия), стоимость его гораздо выше (до 5–6 раз), чем стоимость портландцемента. Выпуск глиноземистого цемента в РФ составляет порядка 0,2 % объема выпуска портландского цемента.

Химический состав глиноземистых цементов, получаемых различными способами, приведен в таблице 13.

Таблица 13

Химический состав глиноземистого цемента

Оксид	Содержание, %	Оксид	Содержание, %
Al_2O_3	30…50	SiO_2	5…10
CaO	35…45	Fe_2O_3	5…15

Минеральный состав:

– $CaO \cdot Al_2O_3$ (CA) – однокальциевый алюминат – основной минерал глиноземистого цемента, определяющий его быстрое твердение и высокую прочность цементного камня;

– другие низкоосновные алюминаты кальция, в частности, $CaO \cdot 2Al_2O_3$ (CA_2), медленно твердеющий, но имеющий высокую конечную прочность (содержится в количестве 20…30 %);

– $2CaO \cdot SiO_2$ (β-C_2S) – белит, характеризующийся медленным твердением;

– $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ – алюмосиликат кальция – геленит, практически не взаимодействующий с водой при нормальных температурах.

Твердение глиноземистого цемента – сложный процесс, представляющий собой результат взаимодействия, в первую очередь, однокальциевого алюмината CA с водой. Процесс твердения глиноземистого цемента и прочность образующегося цементного камня существенно зависят от температуры твердения.

Глиноземистый цемент обладает высокой прочностью только в том случае, если твердеет при температуре не выше 25 °С.

При температуре 20…22 °С гидратация однокальциевого алюмината происходит по реакции:

$$CaO \cdot Al_2O_3 + 10H_2O \rightarrow CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O.$$

При температуре 22…30 °С в присутствии воды CAH_{10} постепенно переходит в двухкальциевый гидроалюминат C_2AH_8, выделяющийся в виде пластинчатых кристаллов гексагональной системы; одновременно образуется гидроксид алюминия в виде гелевидной массы:

$$2(CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O) \rightarrow 2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O + Al_2O_3 \cdot 3H_2O + 9H_2O.$$

При температурах выше 30°С CAH_{10} и C_2AH_8 переходят в стабильный кубический трехкальциевый гидроалюминат C_3AH_6:

$$3(2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O) \rightarrow 2(3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O) + Al_2O_3 \cdot 3H_2O + 9H_2O;$$
$$3(CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O) \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 2(Al_2O_3 \cdot 3H_2O) + 18H_2O.$$

Переход гексагонального C_2AH_8 в кубический C_3AH_6 сопровождается появлением напряжений в цементной системе, что существенно снижает прочность цементного камня. При начальной гидратации 1 ч. по массе СА связывает 1,14 ч. воды с образованием CAH_{10}, при этом объем твердой фазы в смеси СА с водой увеличивается в 3,7 раза, за счет чего образуется малопористый прочный камень. Переход CAH_{10} в C_3AH_6 сопровождается обратным выделением воды из твердой фазы, что уменьшает ее объем на 52,6 %, формируется цементный камень с высокой пористостью, прочность его снижается. Отрицательное воздействие на свойства цементного камня оказывает также неоднократная смена состава и структуры новообразований.

Твердение глиноземистого цемента сопровождается интенсивным тепловыделением, достигающим через сутки 70…80 % полной экзотермии (500 кДж/кг). Тепловыделение портландцемента тех же марок через сутки в 3-4 раза меньше. Из-за интенсивного выделения теплоты возможен саморазогрев бетона на глиноземистом цементе. По этой причине глиноземистый цемент нельзя применять при бетонировании массивных конструкций, в условиях жаркого климата, а также нельзя подвергать его тепловлажностной обработке.

Показатели качества и свойства

К **нормируемым показателям качества** глиноземистого цемента относят: марку по прочности, тонкость помола и сроки схватывания.

Тонкость помола оценивают по остатку на сите № 008 (80 мкм), который должен быть не более 10 % массы просеиваемой пробы.

Истинная плотность глиноземистого цемента 3100…3300 кг/м^3, **насыпная плотность** 1000…1300 кг/м^3.

Нормальная густота составляет 24…28 %.

Глиноземистый цемент обладает нормальными **сроками схватывания**, не смотря на его быстрое твердение: начало – не ранее 45 мин, конец – не позднее 10 ч.

По пределу прочности при сжатии (МПа) в возрасте 3 суток глиноземистые цементы подразделяются на **марки:** ГЦ–40, ГЦ–50, ГЦ–60. Водоцементное отношение для изготовления образцов подбирают таким образом, чтобы расплыв стандартного конуса на встряхивающем столике был равен 105…110 мм. Формы с образцами хранят в течение (6±0,5) ч в ванне с гидравлическим затвором, затем помещают их в ванну с водой. Через (24±2) ч с момента затворения образцы расформовывают, часть подвергают испытаниям, определяя прочность в возрасте 1 сут, остальные помещают в ванну с водой. В возрасте 1 сут. глиноземистый цемент набирает 75…90 % марочной прочности.

В продуктах гидратации глиноземистого цемента не содержатся $Ca(OH)_2$ и $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$, вследствие чего бетон на глиноземистом цементе более **стоек к коррозии** выщелачивания по сравнению с бетонами на портландцементе, а также в растворах сульфата кальция и магния (в частности, в морской воде). Однако затвердевший глиноземистый цемент разрушается в растворах кислот и щелочей.

Усадка глиноземистого цемента при твердении на воздухе в 3…5 раз ниже, чем у портландцемента, **пористость** ниже в 1,5 раза. Бетоны на глиноземистом цементе характеризуются высокой **водостойкостью, морозостойкостью и жаростойкостью**. Жаростойкость глиноземистого цемента тем выше, чем больше в нем глинозема и меньше кремнезема.

Пример **условного обозначения** глиноземистого цемента марки 50:

ГЦ 50 ГОСТ 969–91.

Применение

Глиноземистый цемент применяют: для получения высокопрочных быстротвердеющих бетонов, в особенности, твердеющих при пониженных температурах (при аварийных и ремонтных работах, зимнем бетонировании); в конструкциях, подвергающихся систематическому замораживанию-оттаиванию, увлажнению и высушиванию, особенно, в агрессивных средах; для получения жароупорных бетонов и растворов; для получения расширяющихся и безусадочных цементов.

1.9. Смешанные вяжущие

Получить вяжущие вещества со специальными свойствами можно смешиванием различных вяжущих и других компонентов. К числу смешанных вяжущих относятся расширяющиеся, безусадочные, напрягающие цементы, гипсоцементно-пуццолановые вяжущие (ГЦПВ) и др.

Расширяющиеся цементы предназначены для изготовления расширяющихся, безусадочных, водонепроницаемых бетонов и растворов, применяемых при замоноличивании стыков конструкций и заделке раковин в бетоне, для гидроизоляции стыков сборной обделки тоннелей, для бесшовных тонкослойных стяжек или лицевых покрытий полов большой площади, получаемых из сухих смесей. Состав, характерные свойства и особенности применения таких цементов приведены в таблице 14.

Свойства данных цементов регулируются, в основном, содержанием глиноземистого цемента, а эффект расширения основан на образовании эттрингита, связывающего большое количество воды, и за счет этого увеличивающего объем всей твердеющей массы.

Таблица 14

Расширяющиеся и безусадочные цементы

Вид цемента	Особенности состава	Характерные свойства и особенности применения
Гипсоглиноземистый расширяющийся цемент	Высокоглиноземистый клинкер – 70 %, двуводный гипс – 30 %.	Марки 400, 500. Расширяется в воде; на воздухе является безусадочным; линейное расширение через 3 сут – 0,1…0,7 %; прочность при сжатии через 3 сут ≥ 28 МПа; высокая морозостойкость и сульфатостойкость; начало схватывания – не ранее 10 мин, конец – не позднее 4 ч; водонепроницаемость – не менее 10 атм. ***Применяется*** для зачеканки стыковых соединений труб с рабочим давлением до 10 атм., при строительстве перемычек в емкостях для хранения топлива. Не годится для конструкций, работающих при температурах свыше 80 °С.
Расширяющийся портландцемент (РПЦ)	Портландцементный клинкер – 60…65 %, высокоглиноземистый клинкер – 5…7 %, двуводный гипс 7…10 %, АМД – 20…25 %	Марки 400, 500. Линейное расширение через 28 сут – 0,3…1,0 %; начало схватывания – не ранее 30 мин, конец – не позднее 12 ч. Отличается быстрым твердением в условиях кратковременного пропаривания, высокой плотностью и водонепроницаемостью цементного камня (11 атм. и более).
Напрягающий цемент (НЦ)	Портландцемент – 65…75 %, глиноземистый цемент – 13…20 %, двуводный гипс – 6…10 %.	Типы НЦ–5, НЦ–10, НЦ–20, НЦ–30 с самонапряжением менее 0,7, не менее 0,7; 2 и 3 МПа соответственно. Классы по прочности на сжатие 32,5Н, 32,5Б, 42,5Н, 42,5 Б, требования к прочности – по ГОСТ 31108. Начало схватывания не ранее 30 мин; линейное расширение через 28 суток – не более 2 %. **Применяют** в конструкциях подземных, подводных и различных напорных (напорные трубы, резервуары) сооружений, в самонапряженных железобетонных конструкциях.

Гипсоцементно-пуццолановое вяжущее (ГЦПВ) получают, смешивая полуводный гипс (50…75 %), портландцемент (15…25 %) и активную минеральную добавку (10…25 %). Гипс характеризуется низкой водостойкостью. Портландцемент повышает водо-

стойкость вяжущего вследствие образования водонерастворимых гидросиликатов кальция, защищающих двуводный гипс от растворяющего действия воды. При смешивании портландцемента с гипсом образуется большое количество эттрингита, формируется неустойчивый материал, деформирующий и даже разрушающийся через несколько месяцев. Активная минеральная добавка обеспечивает устойчивость системы. Она связывает образующийся при гидратации портландцемента портландит, в результате чего вместо высокосульфатной формы гидросульфоалюмината кальция (эттрингита) образуется низкольфатная форма без заметного увеличения объема. Из ГЦПВ можно получать бетоны прочностью до 15…20 МПа в зависимости от расхода вяжущего (300…450 кг/м^3) и подвижности бетонных смесей. Коэффициент размягчения таких бетонов 0,6…0,8. Прочность через 2–3 часа после изготовления достигает 40 % марочной. Морозостойкость бетонов на ГЦПВ составляет 20…50 циклов. По сульфатостойкости эти вяжущие равноценны сульфатостойким портландцементам.

ГЦПВ применяют в заводском производстве санитарно-технических кабин, стеновых панелей, вентиляционных блоков и других изделий.

2. БЕТОНЫ НА МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ

2.1. Общие сведения

Бетон (на неорганических вяжущих веществах) – это искусственный каменный материал, получаемый в результате формования и отвердевания рационально подобранной, тщательно перемешанной и уплотненной бетонной смеси, состоящей из вяжущего вещества, воды, заполнителей и различных добавок.

Преимущества бетона как строительного материала:

- Возможность механизации и автоматизации производства;
- Возможность изготовления конструкций любой формы;
- Высокая долговечность и огнестойкость бетона;
- Возможность вариации свойств бетона в широких пределах.

Основные недостатки бетона:

- Прочность на растяжение в 10…15 раз ниже прочности на сжатие;
- Неоднородность свойств бетона, прежде всего, прочности.

Существенный вклад в развитие теории бетонов внесли видные российские (русские, советские) и зарубежные ученые – Скрамтаев Б.Г., Боломе И., Абрамс Д., Волженский А.В., Попов Н.А., Миронов С.А., Баженов Ю.М., Горчаков Г.И., Батраков В.Г., Москвин В.М., Рыбьев И.А., Сахаров Г.П. и многие другие.

2.2. Классификация бетонов (ГОСТ 25192–2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования)

1) По основному назначению:

- Конструкционные;
- Специальные (жаростойкие, химически стойкие, радиационно-защитные, декоративные, теплоизоляционные).

2) По стойкости к видам коррозии:

- А – бетоны, эксплуатируемые в среде без риска коррозионного воздействия (*ХО*);
- Б – бетоны, эксплуатируемые в среде, вызывающей коррозию под действием карбонизации (*ХС*);

- В – бетоны, эксплуатируемые в среде, вызывающей коррозию под действием хлоридов (*XD* и *XS*);
- Г – бетоны, эксплуатируемые в среде, вызывающей коррозию под действием попеременного замораживания–оттаивания (XF);
- Д – бетоны, эксплуатируемые в среде, вызывающей химическую коррозию (*XA*).

3) По виду вяжущего вещества:

- Цементные;
- Известковые;
- Шлаковые;
- Гипсовые;
- Специальные (например, полимербетоны).

4) По виду заполнителя:

- На плотных заполнителях;
- На пористых заполнителях;
- На специальных заполнителях.

5) По структуре:

- Плотной структуры;
- Поризованной структуры;
- Ячеистой структуры;
- Крупнопористой структуры.

6) По условиям твердения:

- Твердеющие в естественных условиях;
- Твердеющие в условиях тепловлажностной обработки при атмосферном давлении (пропаривание);
- Твердеющие в условиях тепловлажностной обработки при давлении выше атмосферного (автоклавного твердения).

7) По прочности бетоны подразделяют на бетоны:

- Средней прочности (класс прочности при сжатии В50 и менее);
- Высокопрочные (класс прочности при сжатии В55 и выше).

8) По скорости набора прочности в естественных условиях бетоны подразделяют на:

- Быстротвердеющие – $\frac{R_2}{R_{28}} > 0{,}4$;
- Медленнотвердеющие – $\frac{R_2}{R_{28}} \leq 0{,}4$;

9) По средней плотности:

- Особо легкие (марки по средней плотности менее *D*800);
- Легкие (марки по средней плотности *D*800…*D*2000);
- Тяжелые (марки по средней плотности *D*2000…*D*2500);
- Особо тяжелые (марки по средней плотности более *D*2500).

10) По морозостойкости бетоны подразделяют на бетоны:

- Низкой морозостойкости (*F*50 и ниже);
- Средней морозостойкости (свыше *F*50 до *F*300);
- Высокой морозостойкости (свыше *F*300).

11) По водонепроницаемости бетоны подразделяют на бетоны:

- Низкой водонепроницаемости (ниже *W*4);
- Средней водонепроницаемости (*W*4…*W*12);
- Высокой водонепроницаемости (свыше *W*12).

12) По истираемости бетоны подразделяют на бетоны:

- Низкой истираемости (марка по истираемости *G*1) – истираемость < 0,7 г/см^2;
- Средней истираемости (марка по истираемости *G*2) – истираемость < 0,8 г/см^2;
- Высокой истираемости (марка по истираемости *G*3) – истираемость < 0,9 г/см^2.

В дальнейшем в лекционном материале вся информация будет посвящена цементному тяжелому бетону плотной структуры на плотных заполнителях, являющемуся основным конструкционным материалом.

2.3. Материалы для тяжелого бетона

Цемент

Вид цемента устанавливается в зависимости от условий эксплуатации конструкций с учетом возможного коррозионного воздействия среды.

Класс цемента устанавливается в зависимости от требуемой прочности бетона по таблицам. Обычно $R_Ц \approx (1{,}5…2)\, R_{28}$.

Для бетонов класса по прочности на сжатие В60 и выше следует применять портландцемент без минеральных добавок марки не ниже ПЦ 500 или класса не ниже ЦЕМ I 42,5 с содержанием C_3A не более 8 %.

Расход цемента назначается по расчету, но не менее минимального значения, определяемого из следующих соображений:

- Обеспечение объема цементного теста, достаточного для получения бетона плотной структуры – 150…270 кг на 1 м^3 бетона в зависимости от вида цемента, вида армирования (ненапрягаемая или напрягаемая арматура) (ГОСТ 26633–2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия).
- Обеспечение стойкости бетона в агрессивных средах – 260…360 кг на 1 м^3 бетона в зависимости от агрессивности среды (СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11–85).

Оптимальный расход цемента в среднем составляет 8…15 % по массе.

Заполнители

Заполнители составляют до 80 % объема бетона. Стоимость заполнителей 30…50 %.

Назначение заполнителей:

- Сокращение расхода цемента;
- Улучшение свойств бетона за счет создания «жесткого каркаса»;
- Повышение прочности и модуля упругости бетона;
- Снижение усадки (усадка цементного камня 1…2 мм/м) и ползучести бетона, повышение долговечности;
- Придание бетону специальных свойств.

В бетоне используются 2 вида заполнителей (рисунок 2):

- Мелкий заполнитель, имеющий зерна размером 0,16…5 мм – песок (речной, карьерный). Песок представляет собой обломочную рыхлую горную породу, состоящую преимущественно из кварца.
- Крупный заполнитель, имеющий зерна размером 5…70 мм – щебень, гравий.

Гравий – неорганический зернистый материал с зернами окатанной формы и гладкой поверхностью крупностью св. 5 мм, получаемый рассевом природных гравийно-песчаных смесей.

Щебень – неорганический зернистый материал с зернами угловатой формы и шероховатой поверхностью крупностью св. 5 мм, получаемый дроблением годных пород, гравия и валунов,

попутно добываемых вскрышных и вмещающих пород или некондиционных отходов горных предприятий по переработке руд. Для бетонов В40 и выше используют щебень.

а) *б)* *в)*

Рис. 2. Заполнители для тяжелого бетона:
а – песок; б – щебень; в – гравий

Основная характеристика заполнителей – зерновой состав, определяемый рассевом пробы на стандартных ситах. По результатам рассева строят графики зернового состава заполнителей. На рисунке 3 приведена установка для просеивания заполнителей.

Рис. 3. Установка для рассева заполнителей

При определении состава бетона заполнители необходимо подбирать таким образом, чтобы обеспечить минимальную межзерновую пустотность, снизив тем самым до минимума расход наиболее дорого компонента бетона – цемента. Существует оптимальный диапазон по зерновому составу заполнителей, обеспечивающий минимальный расход цемента. Этот диапазон представлен граничными линиями на графиках зернового состава заполнителей. График зернового состава применяемого заполнителя должен размещаться в обозначенной оптимальной зоне.

Зерновой состав песка оценивается рассевом пробы на стандартных ситах размером 0,16; 0,315; 0,63; 1,25; 2,5; 5; 10 мм. График зернового состава песка приведен на рисунке 4.

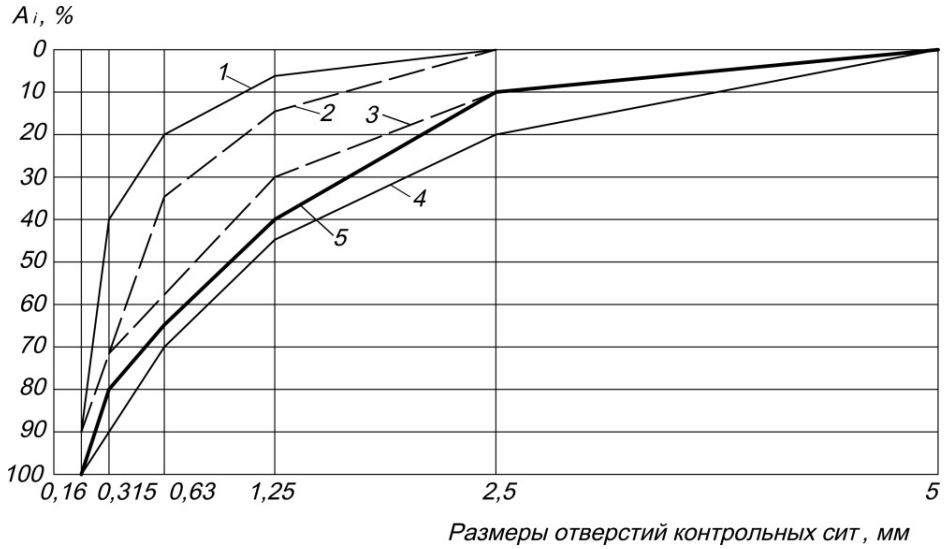


Рис. 4. Пример графика зернового состава мелкого заполнителя (песка): 1 – допускаемая нижняя граница крупности песка ($М_к$ = 1,5); 2 – рекомендуемая нижняя граница крупности ($М_к$ = 2,0) для бетонов класса В15 и выше; 3 – рекомендуемая нижняя граница ($М_к$ = 2,5) для бетонов класса В25 и выше; 4 – допускаемая верхняя граница крупности ($М_к$ = 3,25); 5 – график просеивания песка

Пески классифицируют по крупности в зависимости от модуля крупности:

$$M_К = \frac{(A_{2,5}+A_{1,25}+A_{0,63}+A_{0,315}+A_{0,16})}{100}. \quad (1)$$

Требования к мелкому заполнителю:

- Соответствие зернового состава требованиям стандарта.
- Пустотность песка желательна менее 38 %.
- Зерен размером 5…10 мм должно быть не более 5 %.
- Зерен размером свыше 10 мм быть не должно.
- Истинная плотность песка должна быть 2000…2800 кг/м^3.
- Содержание пылевидных и глинистых частиц, определяемое методом отмучивания, не должно превышать 3 %, для бетонов класса В60 и выше – не более 2 %. Мелкие частицы увеличивают водопотребность бетонной смеси и расход цемента. Глинистые частицы снижают морозостойкость.
- Органические примеси не допускаются.

Зерновой состав крупного заполнителя оценивается рассевом пробы на стандартных ситах размером 5; 10; 20; 40; 70 мм.

Для построения графика зернового состава крупного заполнителя предварительно необходимо определить его наибольшую и наименьшую крупность. Наибольшая крупность D характеризуется размером отверстий сита, полный остаток на котором еще не превышает 10 %, а наименьшая крупность d – размером отверстий первого из сит по ходу просеивания, полный остаток на котором составляет не менее 95 % массы просеиваемой пробы.

По результатам рассева строят график зернового состава (рисунок 5).

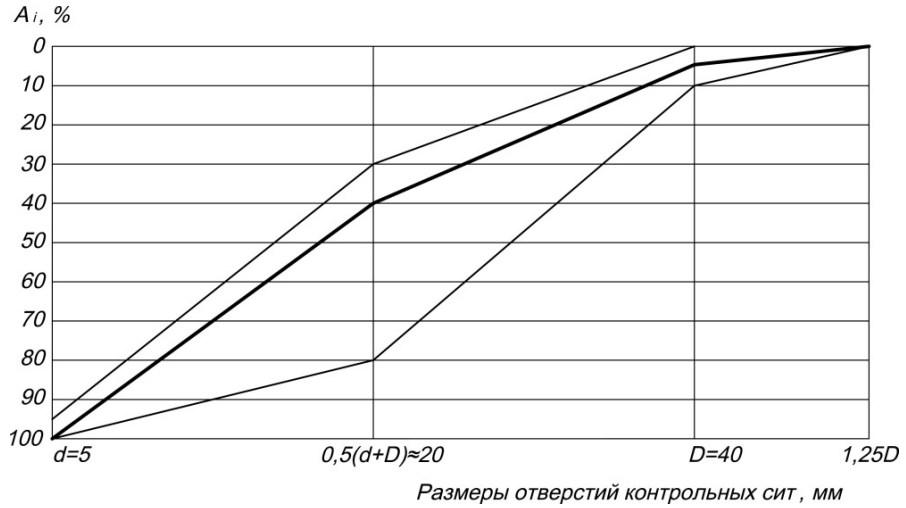


Рис. 5. Пример графика зернового состава крупного заполнителя (щебня, гравия)

Требования к крупному заполнителю:

- Соответствие зернового состава требованиям ГОСТ ($V_{\text{пуст}} \rightarrow \min$). Крупный заполнитель с пустотностью свыше 45 % следует относить к заполнителям пониженного качества.
- Наибольшая крупность заполнителя должна соответствовать размерам сечения конструкции и характеру армирования конструкции. Наибольшая крупность заполнителя D должна быть не более 3/4 наименьшего расстояния в свету между стержнями арматуры и не более 1/3 минимального размера поперечного сечения конструкции.
- Крупный заполнитель не должен содержать зерен лещадной формы более 35 % по массе (для бетонов класса по прочности В60 и выше – не более 15 %). При наличии в заполнителе

зерен удлиненной формы существенно увеличивается пустотность. К зернам лещадной формы относят зерна, имеющие длину, в 3 и более раза превышающую их наименьший поперечный размер. При наличии в заполнителе зерен удлиненной формы существенно увеличивается пустотность.

- Средняя плотность крупного заполнителя (в куске) должна быть 2000...3000 кг/м^3.
- Морозостойкость крупного заполнителя. Установлены следующие марки щебня и гравия по морозостойкости: *F*15; *F*25; *F*50; *F*100; *F*150; *F*200; *F*300; *F*400. Марка по морозостойкости крупного заполнителя назначается в зависимости от температуры эксплуатации конструкций или изделий (таблица 15).

Таблица 15

Выбор марки по морозостойкости крупного заполнителя

Среднемесячная температура наиболее холодного месяца	0…-10 °С	-10…-20 °С	≤-20 °С
Марка крупного заполнителя по морозостойкости	≥*F*100	≥*F*200	≥*F*300

- Прочность крупного заполнителя характеризуют маркой по дробимости при сжатии (раздавливании) в цилиндре. Установлены следующие марки по дробимости: 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400. Марка устанавливается по потере массы крупного заполнителя при стандартном испытании (в цилиндре диаметром 75 мм – под нагрузкой 5 т, диаметром 150 мм – под нагрузкой 20 т).
- Содержание глинистых частиц по массе в щебне из плотных горных пород – не более 1 %, из осадочных пород – не более 2 %.
- Для бетона с маркой по морозостойкости $F_1$200 ($F_2$100) и выше следует применять щебень из плотных пород с водопоглощением не более 1 % или из осадочных пород с водопоглощением не более 2,5 %.

Вода

Используют водопроводную и природную воду (естественные водоемы). Нельзя использовать болотные, сточные бытовые и промышленные воды. Требования к воде приведена в таблице 16.

Таблица 16

Требования к воде для бетонов (ГОСТ 23732–2011. Вода для бетонов и строительных растворов)

Показатель	Бетон с ненапрягаемой арматурой	Бетон с напрягаемой арматурой
Содержание растворимых солей, мг/л, не более	5000	2000
SO_4^{2-}, мг/л, не более	2700	600
Cl^-, мг/л, не более	1200	500
$Na^+ + Ka^+$, мг/л, не более	1,5	
pH	4…12,5	

2.4. Бетонная смесь и ее основные свойства (ГОСТ 7473–2010. Смеси бетонные. Технические условия)

Бетонная смесь – рационально составленная и тщательно перемешанная смесь компонентов бетона до начала процессов схватывания и твердения (до момента укладки бетона в опалубку).

По типу бетонные смеси подразделяют на:

- Бетонные смеси тяжелого бетона (БСТ);
- Бетонные смеси мелкозернистого бетона (БСМ);
- Бетонные смеси легкого бетона (БСЛ).

Основные технологические показатели бетонной смеси:

- Удобоукладываемость;
- Средняя плотность;
- Расслаиваемость;
- Сохраняемость свойств во времени – учитывается при транспортировании бетонной смеси на дальние расстояния. Сохраняемость повышают путем использования химических добавок;
- Пористость (объем вовлеченного воздуха, объем межзерновых пустот);
- Температура.

Удобоукладываемость – свойство бетонной смеси заполнять форму при данном способе уплотнения, а также транспортироваться по различного рода наклонным плоскостям, желобам и т.д., сохраняя при этом свою однородность.

Тиксотропия – свойство бетонной смеси разжижаться при механических воздействиях и вновь загустевать в спокойном состоянии.

В зависимости от показателя удобоукладываемости бетонные смеси подразделяют на 3 группы:

- Ж – жесткие;
- П – подвижные;
- Р – растекающиеся.

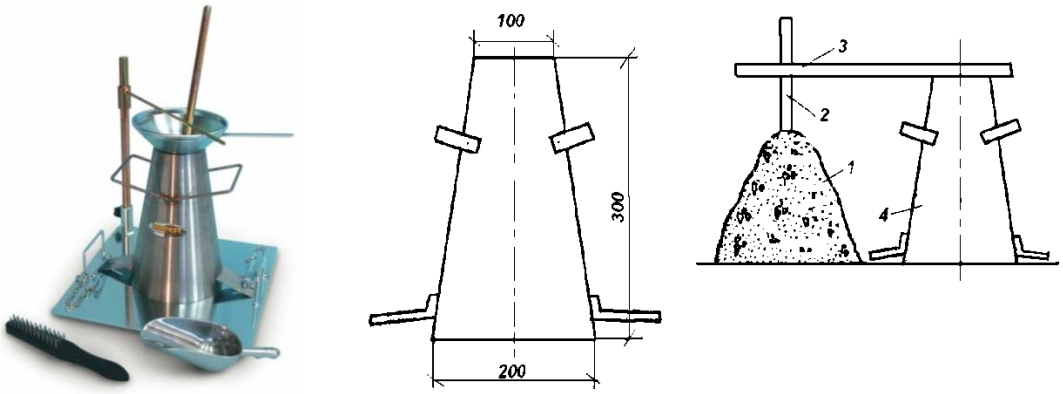
Показателем **подвижности** бетонной смеси является осадка конуса, измеряемая в сантиметрах при помощи конуса Абрамса. На основании осадки конуса устанавливается марка бетонной смеси по подвижности (таблица 17).

Таблица 17

Марки бетонной смеси по осадке конуса

Марка	Осадка конуса, см
П1	1–4
П2	5–9
П3	10–15
П4	16–20
П5	Более 20

Для определения подвижности бетонной смеси с зернами заполнителя наибольшей крупностью до 40 мм включительно применяют нормальный конус (рисунок 6, б), а с зернами наибольшей крупностью более 40 мм – увеличенный (нижним диаметром 300 мм, верхним – 150 мм и высотой 450 мм). Конус устанавливают на гладкий лист и заполняют его бетонной смесью марок П1, П2 или П3 через воронку в три слоя одинаковой высоты. Каждый слой на его высоту уплотняют штыкованием металлическим стержнем в нормальном конусе 25 раз, в увеличенном – 56 раз. Бетонной смесью марок П4 и П5 конус заполняют в один прием и штыкуют 10 раз в нормальном конусе и 20 раз – в увеличенном. После уплотнения бетонной смеси воронку снимают, избыток смеси срезают кельмой вровень с верхними краями конуса, и заглаживают поверхность бетонной смеси. Время от начала заполнения конуса до его снятия не должно превышать 3 мин.



а) *б)*

Рис. 6. Определение подвижности бетонной смеси по осадке конуса: а – оборудование; б – схема испытания

Далее конус плавно снимают с отформованной бетонной смеси в строго вертикальном направлении и устанавливают рядом с ней. Время, затраченное на подъем конуса, должно составлять 5–7 с. Осадку конуса бетонной смеси определяют, укладывая гладкий стержень на верх формы и измеряя расстояние от нижней поверхности стержня до верха бетонной смеси с погрешностью не более 0,5 см. Осадку конуса бетонной смеси, определенную в увеличенном конусе, приводят к осадке нормального конуса умножением осадки увеличенного конуса на коэффициент 0,67.

Жесткость бетонной смеси характеризуют временем вибрации в секундах, необходимым для уплотнения бетонной смеси (таблица 18).

Таблица 18

Марки бетонной смеси по жесткости

Марка	Жесткость, с
Ж1	5–10
Ж2	11–20
Ж3	21–30
Ж4	31–50
Ж5	Более 50

Для определения жесткости бетонной смеси применяют следующие методы:

- Вебе;
- Красного;
- Скрамтаева.

Определение жесткости бетонной смеси на приборе Вебе. Заполнение конуса прибора бетонной смесью, уплотнение смеси и снятие с отформованной смеси конуса производят так же, как при определении подвижности бетонных смесей марок П1–П3. Диск прибора с 6-ю отверстиями массой (2750±50) г устанавливают над отформованным конусом бетонной смеси и плавно опускают его до соприкосновения с поверхностью бетонной смеси (рисунок 7). Включают виброплощадку и секундомер и наблюдают за выравниванием бетонной смеси. Виброплощадка должна обеспечивать вертикально направленные колебания с частотой (2900±100) в минуту и амплитудой (0,5±0,05) мм. Смесь вибрируют до тех пор, пока не начнется выделение цементного теста из любых двух отверстий диска. В этот момент выключают секундомер и виброплощадку. Время, измеренное в секундах, характеризует жесткость бетонной смеси.

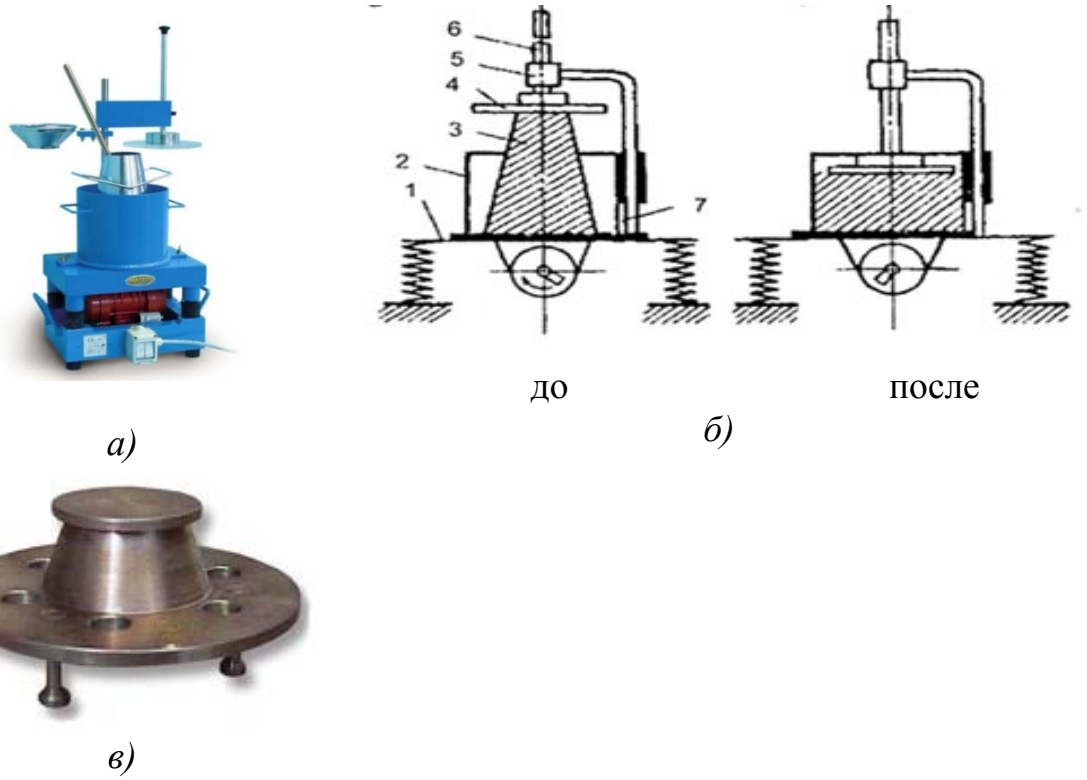


Рис. 7. Определение жесткости бетонной смеси:
а – установка типа Вебе; б – схема определения жесткости бетонной смеси на приборе Вебе; в – прибор Красного;
1 – виброплощадка; 2 – цилиндр с фланцем в основании;
3 – конус для бетонной смеси; 4 – диск с 6-ю отверстиями;
5 – направляющая втулка; 6 – штанга; 7 – штатив

Определение жесткости бетонной смеси по методу Красного. При наибольшей крупности зерен заполнителя до 40 мм включительно используют форму ФК–150, свыше 40 мм – форму ФК–200. Форму закрепляют на виброплощадке и заполняют бетонной смесью доверху с помощью штыкования без виброуплотнения. Избыток смеси срезают кельмой вровень с верхними краями формы. Прибор Красного представляет собой диск диаметром 95 мм, массой (435±15) г, снабженный 3 ножками и 6 отверстиями диаметром 10 мм (рисунок 7, в). Прибор Красного погружают в бетонную смесь ножками вниз до соприкосновения нижней поверхности диска с поверхностью бетонной смеси. Включают одновременно виброплощадку и секундомер и вибрируют смесь до тех пор, пока не начнется выделение цементного молока их любых двух отверстий диска. В этот момент выключают секундомер и виброплощадку. Время, измеренное в секундах, характеризует жесткость бетонной смеси.

Определение жесткости бетонной смеси по методу Скрамтаева. Для испытания берут форму ФК–200. В закрепленную на виброплощадке форму устанавливают конус Скрамтаева и заполняют его бетонной смесью, аналогично смесям марок П1–П3. Конус Скрамтаева имеет верхний диаметр 100 мм, нижний – 194 мм, высоту – 300 мм. Затем конус плавно снимают и одновременно включают виброплощадку и секундомер. Смесь вибрируют до тех пор, полка поверхность бетонной смеси не станет горизонтальной. Время в секундах, необходимое для выравнивания поверхности бетонной смеси в форме, характеризует жесткость бетонной смеси. Переходный коэффициент от метода Скрамтаева к методу Вебе устанавливают экспериментально по прил. Л ГОСТ 10180–2012. Допускается принимать переходный коэффициент равным 0,7.

Расплыв бетонной смеси определяют путем измерения величины расплыва на встряхивающем столе. На основании полученного результата устанавливают марку бетонной смеси по расплыву конуса (таблица 19).

Таблица 19

Марки бетонной смеси по расплыву конуса

Марка	Расплыв конуса, см
Р1	Более 35
Р2	35–41
Р3	42–48
Р4	49–55
Р5	56–62
Р6	Более 62

Для определения расплыва бетонной смеси применяют встряхивающий стол (рисунок 8), состоящий из верхней металлической подвижной плиты размерами в плане 700×700 мм, толщиной не менее 2 мм, шарнирно прикрепленной к нижней плите-основанию, на которую верхняя плита может падать с фиксированной высоты (40±1) мм. Подъем верхней плиты стола производят вручную. В середине верхней подвижной плиты стола устанавливается форма-конус, имеющая нижний внутренний диаметр 200 мм, верхний – 130 мм, высоту 200 мм. Уплотнение бетонной смеси в конусе осуществляется при помощи уплотняющего бруса из твердого материала с рабочей частью квадратного сечения со стороной 40 мм и длиной 200 мм.

Рис. 8. Оборудование для определения расплыва бетонной смеси: встряхивающий слот, форма-конус, уплотняющий брус

Встряхивающий стол устанавливают на плоскую горизонтальную поверхность. Стол и конус очищают и увлажняют до испытания. Форму помещают в центре стола. Далее форму запол-

няют бетонной смесью при помощи совка двумя равными по высоте слоями. Каждый слой уплотняют 10 легкими ударами уплотняющего бруса. После заполнения формы излишек бетонной смеси срезают с помощью уплотняющего бруса вровень с краями формы. Затем форму поднимают за ручки вертикально вверх за время. 3…6 с. Верхнюю плиту стола плавно поднимают за ручку до упора и дают ей свободно упасть. Повторяют цикл 15 раз, проводя каждый цикл за 2…5 с. По окончании испытания линейкой измеряют максимальные размеры расплыва бетонной смеси с точностью 10 мм в двух направлениях, параллельных краям стола. За величину расплыва принимают среднее значение двух результатов измерения. Визуально проверяют расплывшуюся смесь на расслоение. Если образовалось расслоение, результат считают неудовлетворительным.

В таблице 20 приведены требования к расслаиваемости бетонных смесей.

Таблица 20

Требования к расслаиваемости бетонной смеси

Марка по удобоукладываемости	Расслаиваемость бетонной смеси, %, не более		
	Водоотделение	Растворотделение	
		Тяжелых и МЗБ	Легких бетонов
Ж1–Ж5	0,2	3	4
П1–П2	0,4	3	4
П3–П5 и Р1–Р6	0,8	4	6

Условное обозначение бетонной смеси состоит из: сокращенного обозначения бетонной смеси, класса бетона по прочности, марки по удобоукладываемости, и, при необходимости, других нормируемых показателей качества – морозостойкости, водонепроницаемости, средней плотности (для легкого бетона) и обозначения стандарта.

Пример условного обозначения бетонной смеси тяжелого бетона класса по прочности на сжатие *B*25, марок по удобоукладываемости П1, морозостойкости *F*200 и водонепроницаемости *W*4:

БСТ *B*25 П1 *F*200 *W*4 ГОСТ 7473–2010.

Основные факторы удобоукладываемости бетонной смеси:
1) Количественные:

- Расход воды – основной фактор. Количество воды затворения должно быть сведено к минимуму. Цемент связывает 25…28 % воды от своей массы, фактически за 28 суток ≈ 15…18 %. С учетом получения равнопрочных бетонов В/Ц = const, т.е. чем больше в бетоне воды, тем больше требуется цемента, бетон становится дороже. Влияние количества воды затворения на подвижность и жесткость бетонных смесей приведено на рисунке 9. Снизить количество воды затворения, снизить расход цемента или повысить прочность бетона можно за счет применения пластифицирующих (водоредуцирующих) добавок.

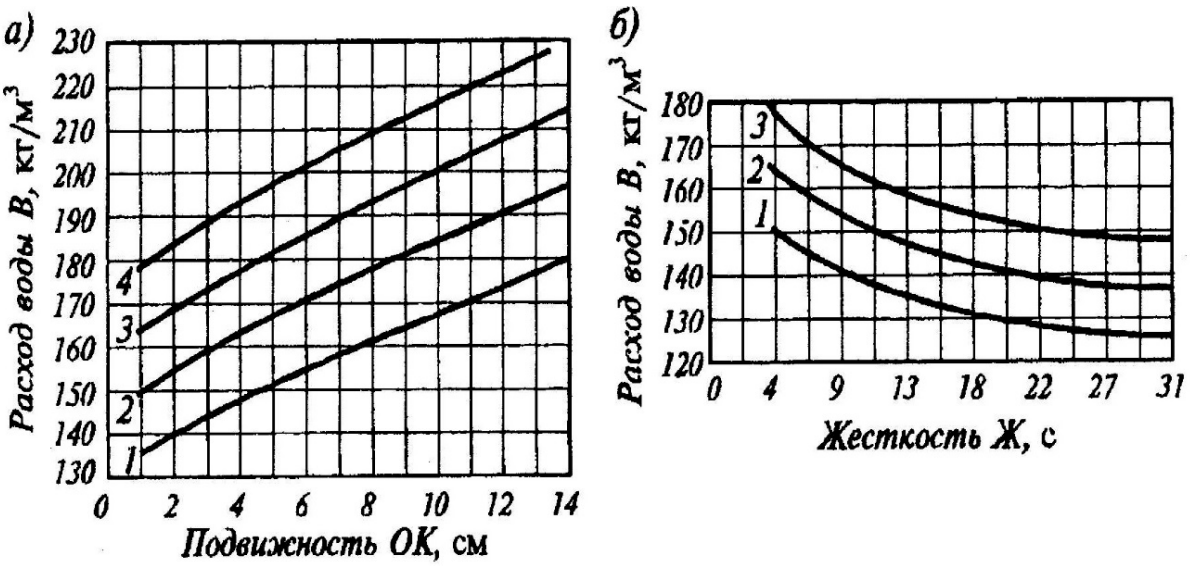


Рис. 9. Водопотребность бетонной смеси, приготовленной с применением портландцемента, песка средней крупности и гравия наибольшей крупности:
а – подвижные смеси; б – жесткие смеси;
1 – 70 мм; 2 – 40 мм, 3 – 20 мм; 4 – 10 мм

- Объем цементного теста.
- Объем цементного раствора. На рисунке 10 приведены типичные структуры плотной бетонной смеси. Если в бетонной смеси заполнить только пустоты между зернами крупного заполнителя, то получится очень жесткая бетонная смесь (рисунок 10, а). Для придания бетонной смеси подвижности необходимо раздвинуть зерна крупного заполнителя и окружить их оболочкой из растворной смеси (рисунок 10, б).

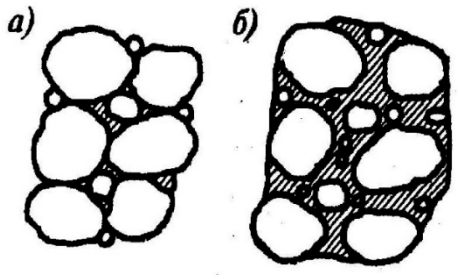


Рис. 10. Структура бетонной смеси:
а – жесткой; б – подвижной

2) Качественные факторы:

- Вид цемента, его водопотребность.
- Вид крупного заполнителя (щебень или гравий). Бетон на гравии обладает лучшей удобоукладываемостью.

2.5. Закон прочности бетона

Качество (прочность) бетона зависит от качества составляющих его материалов и пористости бетона.

Основные факторы прочности бетона:

- Качество цемента (марка $R_Ц$);
- Качество заполнителей, прочность сцепления заполнителей с цементным раствором (учитывается эмпирическим коэффициентом);
- Пористость, которая косвенно определяется величиной В/Ц (или Ц/В).

Зависимость прочности от В/Ц является, по сути, зависимостью прочности от объема пор, образованных водой, не вступающей в химическое взаимодействие с цементом.

Пористость бетона плотной структуры вычисляют по формуле:

$$П = \frac{В - w \cdot Ц}{1000} \cdot 100\ \%,$$

где В и Ц – расходы воды и цемента, кг, на 1 м^3 бетона (1000 л); w – количество химически связанной воды, в долях от расхода цемента.

Кривая зависимости прочности бетона от количества воды затворения (при постоянном расходе цемента и способе уплотнения) характеризует физический смысл закона прочности (рисунок 11). Левая ветвь кривой принадлежит недоуплотненным смесям, много

воздушных пор, прочность бетона снижается. При возрастании количества воды затворения, т.е. В/Ц, эти смеси укладываются плотнее и прочность бетона повышается. При оптимальном количестве воды бетон имеет наибольшую плотность и прочность. При превышении количества воды сверх оптимального, цементная матрица будет характеризоваться повышенной пористостью (лишняя вода – это поры), прочность бетона снижается.

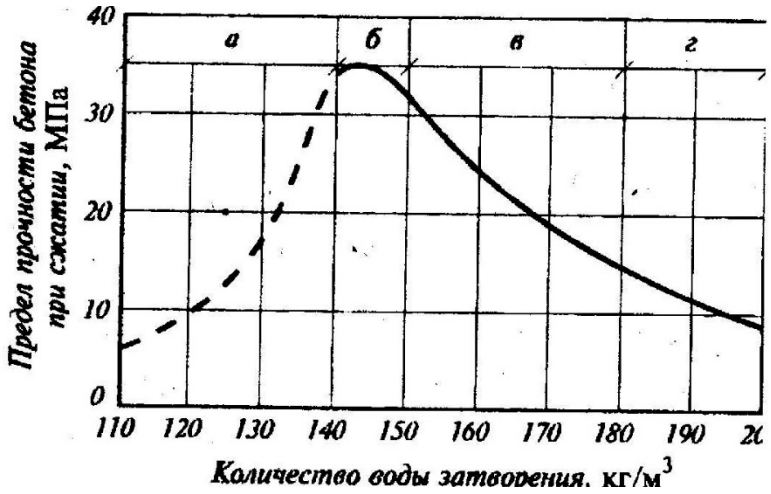


Рис. 11. Общая кривая зависимости прочности бетона от количества воды затворения (при определенном расходе цемента и способе уплотнения): а – область неуплотненных жестких бетонных смесей; б – область наибольшей плотности и прочности бетона; в – область подвижных бетонных смесей; г – область литых бетонных смесей

Вода в бетоне – это поры. Это выражение определяет функциональный смысл основного закона прочности бетона, т.е. лишняя вода – это лишние поры в бетоне, отсюда – снижение прочности (рисунок 12).

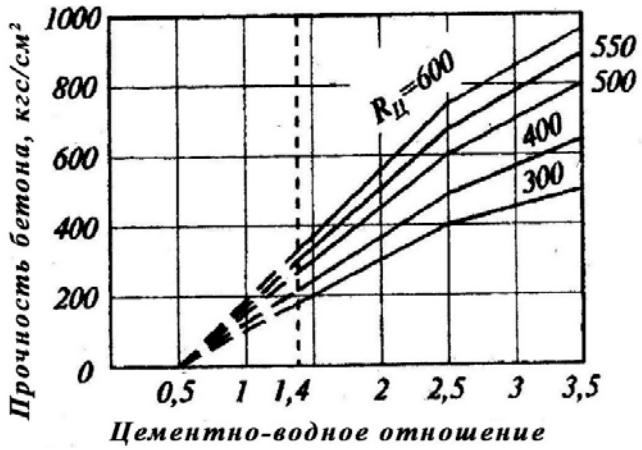


Рис. 12. Графическая интерпретация закона прочности бетона

Обычно основной закон прочности бетона выражают формулой И. Боломея – Б.Г. Скрамтаева:

Для Ц/В<2,5:

$$R_{28} = AR_{Ц}\left(\frac{Ц}{В} - 0{,}5\right),$$

А=0,65 – заполнители повышенного качества;
А=0,60 – заполнители рядового качества;
А=0,55 – заполнители пониженного качества.

Для Ц/В>2,5:

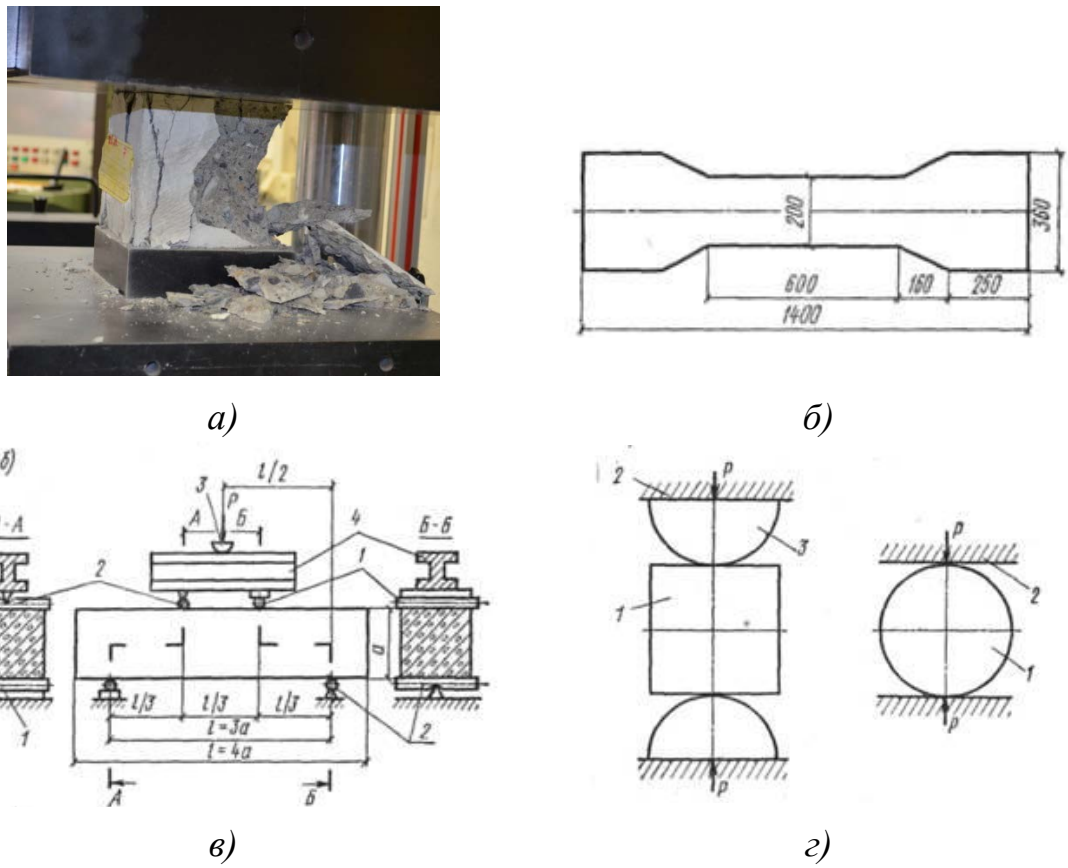
$$R_{28} = AR_{Ц}\left(\frac{Ц}{В} + 0{,}5\right),$$

А=0,43 – заполнители повышенного качества;
А=0,40 – заполнители рядового качества;
А=0,37 – заполнители пониженного качества**.**

2.6. Понятие класса бетона по прочности

Прочность бетона определяется в возрасте 28 суток твердения в условиях, аналогичных условиям твердения конструкции (изделия). **Прочность бетона при сжатии** определяется на образцах-кубах с ребром 10, 15, 20, 30 см. Размеры образца влияют на результат определения прочности, поэтому стандартным считают образец с ребром 15 см. Результаты, полученные на образцах других размеров, приводят к стандартному при помощи поправочных коэффициентов. Серия состоит из 2–6 образцов в зависимости от коэффициента вариации прочности бетона. **Прочность при осевом растяжении** определяют на образцах – восьмерках. **Прочность на растяжение при раскалывании** определяют на кубах или цилиндрах. **Прочность при изгибе** определяют на образцах-призмах. Типовые схемы испытания бетона приведены на рисунке 13.

Ранее для обозначения прочности бетона использовалось понятие **марка бетона по прочности** – характеристика прочности, устанавливаемая на основании среднего уровня прочности бетона, полученного при испытании серии образцов (М50, 75, 100…1000).



а) *б)*

в) *г)*

Рис. 13. Определение прочности бетона:
а – испытание на сжатие; б – образец для испытания на растяжение;
в – схема испытания на изгиб; г – схема испытания
на растяжение раскалыванием

Прочность бетона – величина случайная и подверженная изменению.

Основные факторы прочности бетона:

1. Качество заполнителей, цемента, воды, добавок;
2. Точность дозирования компонентов;
3. Качество перемешивания бетонной смеси;
4. Технология бетонирования;
5. Условия твердения.

Рассмотрим 2 случая. Испытаны по 3 образца двух различных бетонов одной марки. В обоих случаях средняя прочность бетона оказывается одинаковой и марка, устанавливаемая на ее основе, также одинакова. Однако, интуитивно можно сказать, что бетон в случае Б лучше, поскольку он имеет меньший разброс единичных значений прочности.

Случай А	Случай Б
R_1=50 кгс/см²	R_1=90 кгс/см²
R_2=100 кгс/см²	R_2=100 кгс/см²
R_3=150 кгс/см²	R_3=110 кгс/см²
R_m=100 кгс/см²	R_m=100 кгс/см²
М100	М100

Следовательно, средний уровень прочности бетона и марка, устанавливаемая на его основе с вероятностью 50 %, не позволяет в полной мере судить о качестве бетона.

В связи с этим было введено понятие класса бетона по прочности.

Класс бетона по прочности – гарантированное значение прочности стандартных образцов бетона, изготовленных и испытанных в соответствии ГОСТ, обеспеченностью 95 % (см. рис. 14).

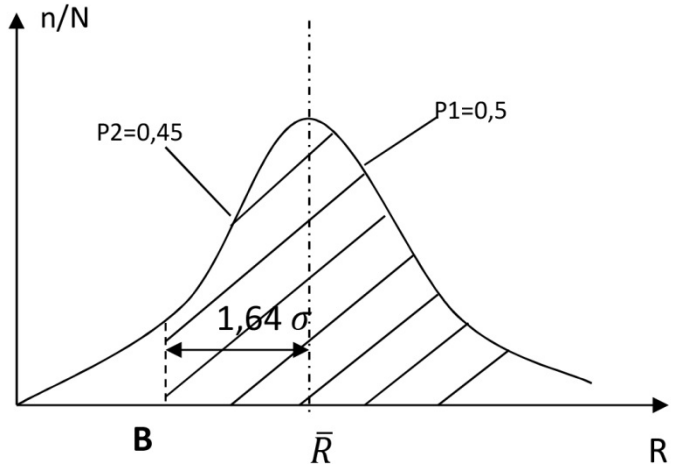


Рис. 14. Кривая нормального распределения (к расчету класса бетона)

Класс бетона вычисляют по формуле:

$$B = R_m(1 - 1{,}64 \cdot V_m), \quad (2)$$

где R_m – средний уровень прочности бетона:

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_i}{n}, \quad (3)$$

n – число образцов;

R_i – единичное значение предела прочности отдельного образца.

V_m – коэффициент вариации прочности бетона:

$$V_m = \frac{S_m}{R_m}, \quad (4)$$

S_m – среднеквадратическое отклонение единичных результатов испытания от средней прочности:

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_i - R_m)^2}{n-1}}. \quad (5)$$

Для тяжелого бетона: $V_m \leq 0{,}135$; V_m=13,5 % – удовлетворительная технология; V_m=7…10 % – хорошая технология.

Для легких бетонов: $V_m \leq 17{,}5$ %; V_m=17,5 % – удовлетворительная технология.

По ГОСТ класс бетона по прочности определяется по формуле:

$$B = \frac{R_m}{K_T}, \quad (6)$$

где K_T – коэффициент требуемой прочности бетона, принимаемый в зависимости от фактического коэффициента вариации прочности бетона, а при отсутствии данных о фактической однородности прочности бетона – при коэффициенте вариации 13,5 % (K_T=1,3).

Прочность бетона – величина, переменная во времени.

Для периода 3…90 суток твердения бетона на портландцементе в естественных условиях справедливо выражение (логарифмическая зависимость; см. рис. 15):

$$\frac{R_n}{R_{28}} = \frac{\lg n}{\lg 28}, \quad (7)$$

где R_n – прочность бетона в возрасте n суток, n=3…90 суток; R_{28} – требуемая прочность бетона в возрасте 28 суток.

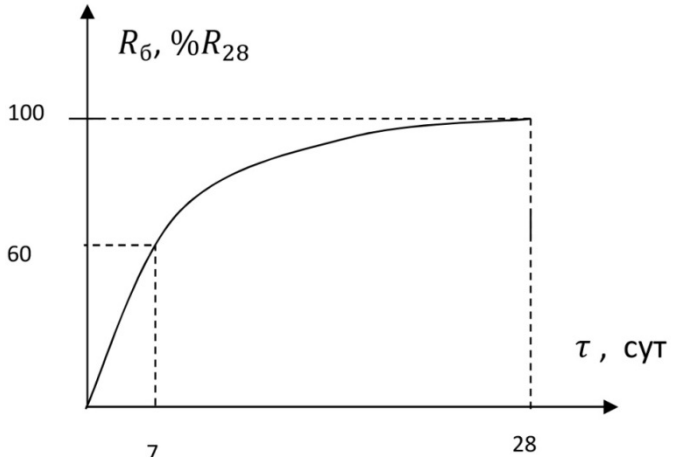


Рис. 15. Графическая интерпретация логарифмической зависимости нарастания прочности бетона

2.7. Основные показатели качества бетона

Основные показатели качества тяжелого бетона регламентированы в соответствии с ГОСТ 26633-2015 Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия:

1. Класс по прочности на сжатие: *B*3,5, *B*5, *B*7,5, *B*10, *B*12,5, *B*15, *B*20, *B*25, *B*30, *B*35, *B*40, *B*45, *B*50, *B*55, *B*60, *B*70, *B*80, *B*90, *B*100, *B*110, *B*120;
2. Класс бетона по прочности на осевое растяжение: B_t0,8, B_t1,2, B_t1,6, B_t2,0, B_t2,4, B_t2,8, B_t3,2, B_t3,6, B_t4,0, B_t4,4, B_t4,8.
3. Классы по прочности на растяжение при изгибе: B_{tb}0,4; B_{tb}0,8; B_{tb}1,2; B_{tb}1,6; B_{tb}2,0; B_{tb}2,4; B_{tb}2,8; B_{tb}3,2; B_{tb}3,6; B_{tb}4,0; B_{tb}4,4; B_{tb}4,8; B_{tb}5,2; B_{tb}5,6; B_{tb}6,0; B_{tb}6,4; B_{tb}6,8; B_{tb}7,2; B_{tb}8,0, B_{tb}8,4, B_{tb}8,8, B_{tb}9,2, B_{tb}9,6, B_{tb}10,0;
4. Марка по морозостойкости по первому базовому методу: $F_1$50, $F_1$75, $F_1$100, $F_1$150, $F_1$200, $F_1$300, $F_1$400, $F_1$500, $F_1$600, $F_1$800, $F_1$1000;
5. Марка по морозостойкости по второму базовому методу $F_2$100, $F_2$150, $F_2$200, $F_2$300, $F_2$400, $F_2$500;
6. Марка по водонепроницаемости: *W*2; 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20.
7. Марка по средней плотности: *D*2000…*D*2500.
8. Марки по истираемости: марки И–I, И–II, И–III – при испытании в полочном барабане, марки *G*1, *G*2, *G*3 – при испытании на круге истирания.

2.8. Физико-механические свойства бетона

- Бетон обладает криволинейной и несимметричной диаграммой σ–ε. Бетон существенно лучше работает на сжатие, чем на растяжение (в 10…20 раз) – рисунок 16.
- Бетон является неупругим материалом. Модуль деформации бетона – величина переменная. Модуль упругости бетона возрастает с увеличением прочности бетона.
- Бетон неоднороден.
- Бетон анизотропен.
- Бетон обладает начальными собственными напряжениями вследствие усадки и температурных деформаций.

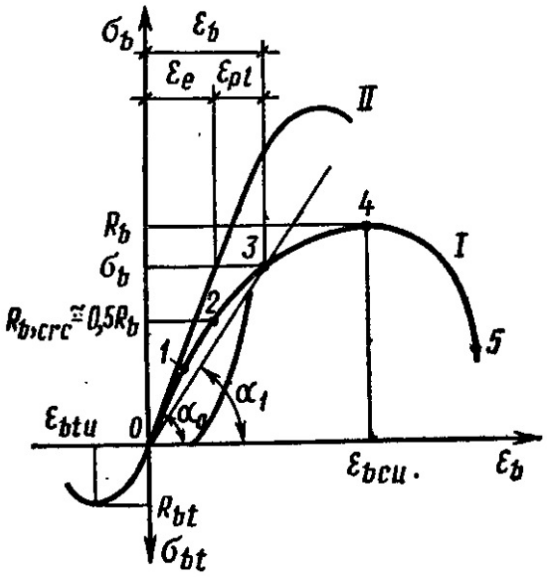


Рис. 16. Диаграмма «σ – ε» для тяжелого бетона

Усадка бетона – уменьшение в объеме бетона при его твердении за счет испарения воды и протекания физико-химических процессов.

Факторы, влияющие на усадку:

1. Время – с течением времени усадка снижается;
2. Влажность – с повышением влажности усадка снижается;
3. Водоцементное отношение – чем больше В/Ц, тем больше усадка;
4. Количество цемента и его активность – чем больше цемента и выше его активность, тем выше усадка.
5. Наличие открытых поверхностей – усадка больше на открытой поверхности.

Достоинство усадки – повышается сцепление бетона с арматурой, недостаток – снижение трещиностойкости, повышение проницаемости бетона и снижение долговечности.

Ползучесть бетона – нарастание неупругих деформаций бетона при длительном действии постоянной нагрузки.

Факторы, влияющие на ползучесть:

1. Время;
2. Уровень напряжений – чем выше уровень напряжений, тем выше ползучесть.
3. Возраст бетона – у «молодого бетона» ползучесть выше;
4. Влажность окружающей среды – чем выше влажность, тем меньше ползучесть;

5. Водоцементное отношение – чем оно больше, тем выше ползучесть;
6. Вид цемента и его содержание. Меньшая ползучесть наблюдается при применении высокомарочных цементов. Чем выше содержание цемента, тем выше ползучесть;
7. Вид заполнителей. Пористый заполнитель усиливает ползучесть.

2.9. Порядок расчета начального состава бетона

Правила подбора, назначения и выдачи в производство состава конструкционного тяжелого бетона для сборных бетонных и железобетонных изделий и монолитных конструкций содержатся в ГОСТ 27006–86.

Номинальный состав бетона подбирают при организации производства новых видов конструкций, изменении нормируемых показателей качества бетона или бетонной смеси, технологии производства, характеристик применяемых материалов.

Подбор номинального состава бетона включает:

- выбор и определение характеристик исходных материалов;
- расчет **начального состава;**
- расчет **дополнительных составов** бетона с параметрами составов, отличающихся от принятых в начальном составе в большую и меньшую сторону на 15…30 % (варьируется цементно-водное отношение, соотношение крупного и мелкого заполнителей, расход добавок);
- изготовление пробных замесов начального и дополнительных составов, испытание бетонной смеси, изготовление образцов и их испытание по всем показателям качества;
- обработка полученных результатов с установлением зависимостей, отражающих влияние параметров состава на нормируемые показатели качества бетонной смеси и бетона;
- назначение номинального состава бетона, обеспечивающего получение бетонной смеси и бетона требуемого качества при минимальном расходе вяжущего.

Состав бетона подбирают исходя из **требуемой прочности** – минимально допустимого среднего значения прочности бетона в партии изделий, соответствующего нормируемой прочности бетона при ее фактической однородности.

Рабочие составы бетона назначают при переходе на новый номинальный состав и далее при поступлении новых партий материалов тех же видов и марок, которые принимались при подборе номинального состава, с учетом их фактического качества. Корректировку рабочего состава производят, если по данным входного контроля качества заполнителей и операционного контроля производства установлено изменение качества материалов или качества получаемой бетонной смеси, а также в случае, если фактическая прочность бетона оказывается ниже требуемой.

Рабочую дозировку назначают по рабочему составу бетонной смеси с учетом объема приготовляемого замеса.

Расчет начального состава бетона производится на основании формул и справочных таблиц.

Порядок расчета начального состава бетона:

1. Устанавливают характеристики исходных материалов;
2. По справочным таблицам назначают марку (класс) цемента;
3. Определяют требуемое количество воды по справочным таблицам в зависимости от заданной удобоукладываемости бетонной смеси, вида и наибольшей крупности крупного заполнителя, водопотребности песка;
4. Устанавливают требуемую прочность бетона по формуле:

$$R_{\text{Т}} = \text{К}_{\text{Т}} \cdot B_{\text{норм}} \qquad (8)$$

5. Из формулы основного закона прочности бетона определяют цементно-водное отношение:

$$\frac{\text{Ц}}{\text{В}} = \frac{R_{\text{Т}}}{\text{А} \cdot R_{\text{Ц}}} + 0{,}5 \qquad (9)$$

и водоцементное отношение:

$$\frac{\text{В}}{\text{Ц}} = \frac{1}{\frac{\text{Ц}}{\text{В}}} \qquad (10)$$

5. Определяют требуемый расход цемента, который не должен быть ниже минимального:

$$\text{Ц} = \text{В} \cdot \frac{\text{Ц}}{\text{В}} \qquad (11)$$

6. Из уравнения абсолютных объемов:

$$\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{Ц}}} + \frac{\text{В}}{\rho_{\text{В}}} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{П}}} + \frac{\text{К}}{\rho_{\text{К}}} = 1000, \qquad (12)$$

и условия заполнения пустот между зернами крупного заполнителя цементно-песчаным раствором с их некоторой раздвижкой:

$$\frac{Ц}{\rho_Ц} + \frac{В}{\rho_В} + \frac{П}{\rho_П} = \alpha_К \cdot \frac{К}{\rho_{НК}} \cdot k_{р.з.},$$

где Ц, В, П, К, – расходы цемента, воды, песка и крупного заполнителя, кг; $\rho_Ц$, $\rho_В$, $\rho_П$, $\rho_К$ – истинные плотности этих материалов, кг/дм^3; $\rho_{НК}$ – насыпная плотность крупного заполнителя, кг/дм^3; $\alpha_К$ – пустотность крупного заполнителя в рыхлонасыпном состоянии в долях единицы объема, вычисляемая по формуле:

$$\alpha_К = 1 - \frac{\rho_{НК}}{\rho_К}, \quad (13)$$

$k_{р.з.}$ – безразмерный коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя цементно-песчаным раствором; определяют расход крупного заполнителя:

$$К = \frac{1000}{\frac{\alpha_К \cdot k_{р.з.}}{\rho_{НК}} + \frac{1}{\rho_К}}, \quad (14)$$

и расход песка:

$$П = \left[1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_Ц} + \frac{В}{\rho_В} + \frac{К}{\rho_К}\right)\right] \cdot \rho_П. \quad (15)$$

Затем выполняют расчет ***дополнительных составов*** бетона с параметрами составов, отличающихся от принятых в начальном составе в большую и меньшую сторону на 15…30 % (варьируется цементно-водное отношение, соотношение крупного и мелкого заполнителей, расход добавок); выполняют пробные замесы начального и дополнительных составов; назначают ***номинальный состава бетона***, обеспечивающий получение бетонной смеси и бетона требуемого качества при минимальном расходе вяжущего; назначают ***рабочий состав бетона*** с учетом фактического качества компонентов бетона; назначают ***рабочие дозировки*** с учетом фактического объема замеса.

Также начальный состав бетона может быть рассчитан по методике НИИЖБ. Отличие от вышеприведенной методики через коэффициент раздвижки состоит в определении расход заполнителей, расход воды и вяжущего по этим методикам определяются одинаково.

Определяют абсолютный объем заполнителей:

$$V_З = 1000 - \frac{В}{\rho_В} - \frac{Ц}{\rho_Ц}. \quad (16)$$

Определяют расход песка:

$$П = V_З \cdot r \cdot \rho_П \quad (17)$$

и крупного заполнителя:

$$К = V_З \cdot (1 - r) \cdot \rho_К, \quad (18)$$

где ***r*** – доля песка в смеси заполнителей по абсолютному объему. определяемая по таблице 21:

$$r = \frac{\frac{П}{\rho_П}}{\frac{П}{\rho_П} + \frac{К}{\rho_К}}. \quad (19)$$

Таблица 21

Определение доли песка *r* в смеси заполнителей на 1 м³ бетонной смеси (при удобоукладываемости от Ж=20 с до ОК=10 см)

Расход цемента, кг/м³	Наибольшая крупность щебня, мм		
	10	20	40
200	0,45	0,42	0,39
300	0,42	0,39	0,36
400	0,39	0,36	0,33
500	0,36	0,33	0,30
600	0,33	0,3	0,27

Примечания

1. Таблица составлена для песка с Мк=2 и щебня. При увеличении или уменьшении Мк на ±0,5 доля песка увеличивается на 0,03.
2. При использовании гравия доля песка уменьшается на 0,05.
3. Доля жестких бетонных смесей Ж>20 доля песка уменьшается на 0,04; при подвижных бетонных смесях с ОК >10 см доля песка увеличивается на 0,04.

2.10. Производственные факторы прочности бетона

1. На этапе подбора исходных материалов и проектирования состава бетона:

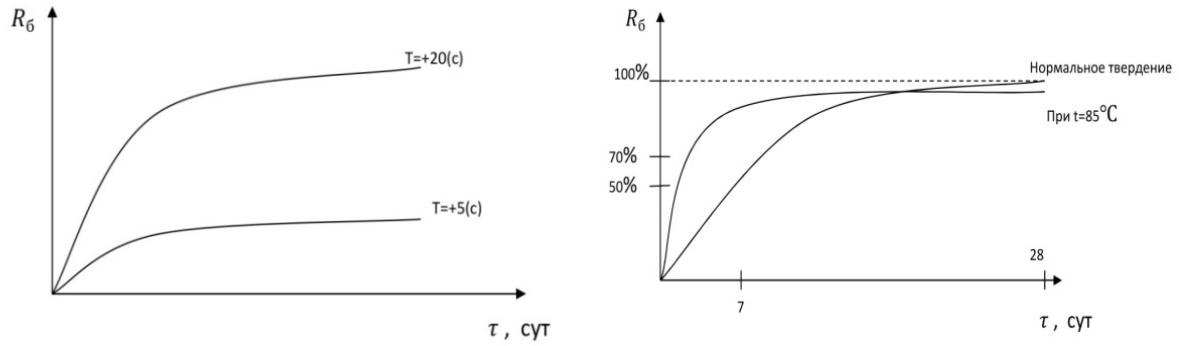
- качество цемента и его количество;
- качество и количество заполнителей;
- качество и количество воды;

2. На этапе приготовления и укладки бетонной смеси:

- точность дозировок;
- однородность бетонной смеси (качество смешивания);
- укладка в опалубку и уплотнение бетона. Основные способы уплотнения бетонной смеси – вибрирование, виброштампование, вибропрессование, трамбование, вакуумирование, центрифугирование;

3. На этапе твердения бетона:

- длительность твердения;
- температура окружающей среды (см. рис. 17);
- влажность окружающей среды.



а) *б)*

Рис. 17. Влияние температуры твердения на прочность бетона: а – графики набора бетоном прочности при различных температурах; б – графики набора бетоном прочности, твердеющим в естественных условиях и в условиях ТВО при атмосферном давлении (пропаривание)

Основные способы ускорения твердения бетона:

- Применение быстротвердеющего цемента;
- Применение добавок-ускорителей набора прочности;
- Применение тепловлажностной обработки изделий (ТВО).

2.11. Основные виды добавок для бетонов

Добавки для тяжелого бетона могут быть минеральными (активные и инертные) и химические.

Минеральные добавки являются неотъемлемым компонентом современных бетонов. Их применение позволяет: снизить содержание цемента, модифицировать состав новообразований матрицы, повысить плотность структуры, и, как следствие, проч-

ность, долговечность и стойкость бетона в агрессивных условиях эксплуатации.

Минеральные добавки представляют собой тонко измельченные материалы, которые добавляются в бетоны в относительно больших количествах (более 20 % массы цемента). Минеральные добавки могут быть активными (зола-уноса, гранулированные доменные шлаки, микрокремнезем, природные пуццоланы) или инертными.

Применение минеральных добавок оказывает благоприятное влияние на многие свойства бетона. Это связано либо с физическим эффектом, который проявляется в том, что мелкие частицы обычно имеют более тонкий гранулометрический состав, чем портландцемент, либо с их пуццолановой активностью при твердении цемента. Чем выше удельная поверхность добавки, тем она эффективнее и тем меньше ее требуется для достижения наибольшего эффекта повышения прочности бетона или снижения расхода цемента.

Химические добавки:

- Пластифицирующие (водоредуцирующие) – снижение водопотребности бетонных смесей;
- Стабилизирующие – снижение расслаиваемости бетонных смесей;
- Регулирующие сохраняемость подвижности – увеличение или снижение времени сохраняемости первоначальной подвижности;
- Воздухововлекающие добавки – позволяют контролируемому количеству воздуха равномерно распределяться в бетонной смеси во время перемешивания и оставаться в бетоне после затвердевания в виде условно-замкнутых пор;
- Ускорители и замедлители твердения;
- Противоморозные добавки – обеспечивающие твердение бетона при отрицательных температурах;
- Гидрофобизаторы – придают стенкам пор и капилляров в бетоне гидрофобные (водоотталкивающие) свойства и уменьшают капиллярную адсорбцию бетона;
- Снижающие проницаемость – повышают марку бетона по водонепроницаемости вследствие уплотнения его структуры;
- Биоцидные добавки – обладают бактерицидными и фунгицидными свойствами;

- Повышающие защитные свойства по отношению к стальной арматуре (ингибиторы коррозии);
- Повышающие коррозионную стойкость;
- Расширяющие добавки.

2.12. Легкие бетоны на пористых заполнителях

Легкие бетоны получают путем введения в бетон пористых заполнителей.

Классификация легких бетонов на пористых заполнителях:

1. По основному назначению:

- Конструкционные;
- Специальные;

2. По виду заполнителя:

- Керамзитобетон (бетон на керамзитовом гравии). Насыпная плотность керамзита 250…800 кг/м^3;
- Шунгизитобетон (бетон на шунгизитовом гравии);
- Аглопоритобетон (бетон на аглопоритовом щебне или гравии);
- Шлакопемзобетон (бетон на шлакопемзовом щебне или гравии);
- Перлитобетон (бетон на вспученном перлитовом щебне);
- Бетон на щебне из пористых горных пород;
- Термолитобетон (бетон на термолитовом щебне или гравии);
- Вермикулитобетон (бетон на вспученном вермикулите);
- Шлакобетон (бетон на золошлаковых смесях тепловых электростанций – ТЭС или на топливном шлаке, гранулированном доменном или электротермофосфорном шлаке);
- Полистиролбетон (в качестве заполнителя используют вспученные гранулы полистирола).

3. По структуре:

- Плотные;
- Поризованные – растворную часть вспучивают при помощи пено- и газообразующих добавок;
- Крупнопористые – не содержат песка, сохраняются межзерновые пустоты.

4. По средней плотности:

- Теплоизоляционные, с прочностью до 1,5 МПа;
- Конструкционно-теплоизоляционные с прочностью 2…10 МПа;
- Конструкционные, с прочностью 10…30 МПа.

Основные показатели качества легких бетонов на пористых заполнителях:

1. Прочность на сжатие:

- теплоизоляционные – *B*0,35; *B*0,5; *B*0,75; *B*1; *B*1,5; *B*2;
- конструкционно-теплоизоляционные – *B*2,5; *B*3,5; *B*5; *B*7,5; *B*10;
- конструкционные бетоны – *B*12,5; *B*15; *B*20; *B*25; *B*30; *B*35; *B*40.

2. Средняя плотность – *D*200, *D*300, *D*400, *D*500, *D*600, *D*700, *D*800, *D*900, D1000, *D*1100, *D*1200, *D*1300, *D*1400, *D*1500, *D*1600, *D*1700, *D*1800, *D*1900, *D*2000;

3. Морозостойкость – *F*25, *F*35, *F*50, *F*75, *F*100, *F*150, *F*200, *F*300, *F*400, *F*500 (нормируется, начиная с *D*700);

4. Водонепроницаемость – *W*2, *W*4, *W*6, *W*8, *W*10, *W*12;

5. Теплопроводность.

Основные факторы прочности легкого бетона:

1. Водоцементное отношение.

2. Прочность пористого заполнителя. Пористые заполнители имеют невысокую прочность, обычно ниже прочности цементного раствора. Введение такого заполнителя приводит к снижению прочности бетона, при том тем в большей степени, чем больше содержание заполнителя. Каждый крупный заполнитель позволяет получать бетоны только до определенной прочности, по достижении которой повышение прочности растворной составляющей не приводит к увеличению прочности бетона (имеет место перерасход цемента). Поэтому необходимо выбирать прочность заполнителя, чтобы рационально использовать цемент.

3. Концентрация заполнителя. Влияние концентрации заполнителя зависит от соотношения его прочности к прочности раствора.

Особенности легкого бетона:

- Введение пористого заполнителя изменяет деформативные свойства бетона. Уменьшается модуль упругости.
- Увеличение содержания пористого заполнителя приводит к снижению плотности и снижению коэффициента теплопроводности.
- Пористые заполнители обладают значительным водопоглощением, отсасывают из цементного раствора часть воды. Т.е. легкий бетон характеризуется повышенным расходом воды.

- Пористый заполнитель влияет на процесс структурообразования бетона, на первом этапе отсасывая влагу и способствуя получению плотного и прочного контактного слоя. На втором этапе при уменьшении количества воды в цементном камне вследствие гидратации цемента, пористые заполнители отдают воду, создавая благоприятные условия гидратации цемента и снижая усадку цементного камня.
- Высокая шероховатость поверхности заполнителя обеспечивает хорошее сцепление между цементным камнем и заполнителем.
- Пористый щебень и песок обладают увеличенным объемом межзерновых пустот, что требует в 1,5…2 раза больше цементного теста.

2.13. Ячеистый бетон

Ячеистый бетон – это особо легкий бетон с большим количеством (до 85 % общего объема бетона) мелких и средних воздушных пор размером 1…1,5 мм.

Классификация ячеистых бетонов:

1. По назначению:

- Конструкционные;
- Конструкционно-теплоизоляционные;
- Теплоизоляционные.

2. По условиям твердения:

- Автоклавные – твердеющие в среде насыщенного пара при давлении выше атмосферного;
- Неавтоклавные (гидратационного твердения) – твердеющие в естественных условиях, при электропрогреве или в среде насыщенного пара при атмосферном давлении.

3. По способу порообразования:

- Газобетоны – пористость придается химическим путем. Вводятся газообразующие добавки, например, алюминиевая пудра;
- Пенобетоны – пористость придается механическим путем, когда в сырьевую смесь вводят предварительно приготовленную пену или пенообразователь;
- Газопенобетоны.

4. По виду основного вяжущего бетоны подразделяют:

- На известковых вяжущих, состоящих из извести-кипелки более 50 % по массе, шлака и гипса или добавки цемента до 15 % по массе;
- На цементных вяжущих, в которых содержание портландцемента 50 % и более по массе;
- На смешанных вяжущих, состоящих из портландцемента от 15 до 50 % по массе, извести или шлака, или шлако-известковой смеси;
- На шлаковых вяжущих, состоящих из шлака более 50 % по массе в сочетании с известью, гипсом или щелочью;
- На зольных вяжущих, в которых содержание высокоосновных зол 50 % и более по массе.

Сырьевые материалы:

- Для неавтоклавного бетона в качестве вяжущего используют портландцемент марок 400 и выше;
- Для автоклавного бетона используют следующие смеси:
  - ✓ Цемента с кварцевым песком, при этом часть песка обычно размалывают;
  - ✓ Молотой негашеной извести с песком, частично измельченным. Такие материалы называют пеносиликат или газосиликат;
  - ✓ Цемента, извести и песка в различных соотношениях.

Для автоклавного ячеистого бетона наиболее целесообразно применять портландцемент совместно с негашеной известью в отношении 1:1.

- В качестве заполнителей используют тонкомолотые кварцевые пески, содержащие не менее 85 % кремнезема, удельная поверхность 1200…2000 $см^2/г$, золу-уноса.
- Расход пенообразователя обычно составляет 4…12 % от массы воды, расход газообразователя – алюминиевой пудры – 0,25…0,6 $кг/м^3$.

Основные показатели качества ячеистых бетонов:

- Прочность на сжатие. Классы по прочности – (*B*0,35) *B*0,5; *B*0,75; *B*1; *B*1,5; *B*2; *B*2,5; *B*3,5; *B*5; *B*7,5; *B*10; *B*12.5; *B*15, (*B*17,5; *B*20). Прочность автоклавного бетона обычно выше на 1…2 ступени.

- Средняя плотность. Марки бетонов по средней плотности в сухом состоянии: (*D*200; *D*250); *D*300; *D*350; *D*400; *D*500; *D*600; *D*700; *D*800; *D*900; *D*1000; *D*1100; *D*1200.
- Морозостойкость. Марки по морозостойкости: *F*15; *F*25; *F*35; *F*50; *F*75; *F*100 (устанавливаются для конструкций, подвергающихся попеременному замораживанию – оттаиванию). Нормируется, начиная с *D*500 для автоклавного и *D*600 для неавтоклавного бетона. За марку по морозостойкости ячеистых бетонов принимают число циклов переменного замораживания и оттаивания, после которых прочность на сжатие ячеистых бетонов снижается не более чем на 15 %, а потеря массы составляет не более 5 %.
- Усадка при высыхании в пределах 0,5…3 мм/м.
- Теплопроводность. Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии находится в переделах (0,06) 0,1…0,4 Вт/(м·°С). *D*400 – 0,1; *D*500 – 0,12; *D*600 – 0,14; *D*700 – 0,18.
- Паропроницаемость. Коэффициент паропроницания 0,08…0,26 мг/(м·ч·Па).
- Сорбционная влажность 8…22 % в зависимости от влажности воздуха.
- Ячеистые бетоны относят к негорючим материалам – НГ.

Основной вид изделия из ячеистых бетонов – **стеновые блоки**. Максимальные размеры блоков – 600×500×500 мм.

В зависимости от отклонений от размеров и наличия дефектов внешнего вида, установлены **2 категории** блоков: I – рекомендуется для кладки на клею, II – для кладки на растворе.

Пример условного обозначения блока категории I, длиной 600, шириной 300 и высотой 200 мм, марки по средней плотности *D*500, класса по прочности на сжатие *B*2,5, марки по морозостойкости *F*25:

Блок I / 600×300×200 / *D*500 / *B*2,5 / *F*25 ГОСТ 31360-2024.

Преимущества ячеистых бетонов:

- Хорошая тепло- и звукоизолирующая способность;
- Экологичность;
- Снижение материалоемкости строительства;
- Технологичность (легко обрабатывается, пилится, гвоздится);
- Пожаробезопасен.

Недостатки ячеистых бетонов:

- Низкая прочность;
- Низкая морозостойкость.

2.14. Мелкозернистый бетон

Мелкозернистым называют бетон, в котором отсутствует крупный заполнитель (песчаный бетон).

Применение в качестве заполнителя только песка приводит к увеличению удельной поверхности заполнителя и его пустотности, расход цемента и воды увеличиваются на 15…25 %, повышается усадка и пористость. Применение модификаторов позволяет получать безусадочные МЗБ.

Достоинства МЗБ:

- Однородность структуры;
- Повышенная эффективность модификации материала добавками;
- Высокая тиксотропия бетонной смеси;
- Высокая технологичность – возможность формования изделий методами литья, экструзии, прессования, штампования и др.;
- Легкая транспортируемость, в т.ч. по трубопроводам;
- Возможность широкого применения ССС;
- Возможность изготовления тонкостенных и слоистых конструкций;
- Возможность широкого применения местных материалов.

Для МЗБ существует оптимальное соотношение Ц:П, при котором достигается максимальная плотность бетонной смеси. Исходя из опыта проектирования составов МЗБ, наиболее экономичны составы 1:2…1:3, обладающие и наибольшей плотностью. Т.е. МЗБ характеризуется повышенным расходом цемента.

МЗБ необходимо тщательно уплотнять и использовать приемы, повышающие тиксотропию бетонной смеси. Бетоны уплотняются под действием силы тяжести. В МЗБ частицы песка имеют малые размеры и массу, степень уплотнения снижается. Повышенная удельная поверхность песка усиливает этот эффект.

Мелкозернистая бетонная смесь характеризуется повышенным воздухововлечением – 3…6 %.

Для МЗБ желательно использовать крупные чистые пески, поскольку замена крупного песка мелким может привести к снижению прочности до 2…3 раз.

МЗБ отличается повышенной прочностью при изгибе, водонепроницаемостью и морозостойкостью. В современной технологии МЗБ, используют композиционные вяжущие, комплексы химических модификаторов, активные минеральные добавки, что позволяет эффективно управлять структурообразованием материала. Введение в МЗБ микрокремнезема позволяет в несколько раз снизить усадку. Эти приемы позволяют получить МЗБ с высокими показателями свойств: прочность на сжатие до 100…150 МПа, морозостойкость до *F*600, водонепроницаемость *W*12, водопоглощение менее 1…2 %.

2.15. Понятие о железобетоне

Железобетонными называют комплексные конструкции, состоящие из бетона и заключенной в нем арматуры.

Назначение арматуры – восприятие растягивающих усилий в конструкции, т.к. бетон плохо работает на растяжение.

Железобетон занимает до 75 % среди всех строительных конструкций.

Области применения железобетона:

– Промышленные здания;

– Гражданские здания;

– Инженерные сооружения (резервуары, градирни, теле- и радиобашни, дымовые трубы);

– Здания и сооружения транспортного строительства (мосты, эстакады, тоннели, метро);

– Здания и сооружения энергетического строительства (ГЭС, ТЭС, АЭС);

– Тонкостенные пространственные покрытия зданий и сооружений (театры, стадионы, выставочные залы).

Достоинства железобетона:

– Долговечность;

– Огнестойкость;

– Противодействие атмосферным воздействиям;

– Радиационная стойкость;

– Экономия металла;

– Возможности использования местных материалов;

– Низкие эксплуатационные расходы;

– Возможности создания конструкций произвольной формы и др.

Недостатки железобетона:

– Большая масса конструкций, низкий коэффициент конструктивного качества;

– Возможность возникновения трещин в конструкциях;

– Высокая тепло- и звукопроводность и др.

По функциональному назначению **арматура** может быть рабочей (ставится по расчету) и конструктивной (ставится по конструктивным и монтажным соображениям).

По способу изготовления арматура может быть горячекатаной (стержневой) и холоднотянутой (проволочной). Для армирования железобетонных конструкций применяют арматуру гладкую и периодического профиля. Возможны специальные виды арматуры – жесткая (из металлопроката); профлист; неметаллическая арматура; фибра и т.д.

Для армирования железобетонных конструкций используют:

– каркасы (сварные или вязаные);

– сетки (сварные или вязаные);

– канатную арматуру (для предварительно напряженных конструкций).

Сцепление арматуры с бетоном обеспечивается за счет: склеивания (10 %), трения (15 %), механического зацепления (75 %).

Совместная работа арматуры и бетона обеспечивается:

1. За счет хорошего сцепления бетона и арматуры;
2. У бетона и стальной арматуры примерно одинаковые коэффициенты линейного температурного расширения (сталь $11{,}8\times10^{-6}$ 1/°С; бетон $10{,}0\times10^{-6}$ 1/°С);
3. Бетон характеризуется щелочной средой и пассивирует сталь при значениях pH свыше 11,8 (является защитой стали от коррозии, при условии целостности защитного слоя бетона).

Предварительно напряженными называют конструкции, в которых до приложения внешней нагрузки искусственным образом создаются значительные сжимающие напряжения в бетоне за счет натяжения арматуры.

Идея предварительного напряжения – создание начальных сжимающих напряжений в тех зонах, которые при действии внешней нагрузки испытывают растяжение.

За счет предварительного напряжения:

– Повышается жесткость конструкций (снижается величина прогиба);

– Повышается трещиностойкость конструкций (трещины образуются при большем уровне нагружения и ширина их раскрытия меньше);

– Несущая способность конструкций практически не увеличивается;

– Достигается некоторая экономия за счет применения высокопрочных материалов.

Способы натяжения арматуры:

– Механический (используют домкраты);

– Электротермический (пропусканием электрического тока через арматуру);

– Электротермомеханический.

Способы изготовления железобетонных конструкций:

– Монолитные – возводятся на строительной площадке;

– Сборные – изготавливаются на заводе и монтируются на строительной площадке;

– Сборно-монолитные – сборная часть выполняется на заводе, а монолитная – на строительной площадке.

Достоинства сборного железобетона:

– Возможность автоматизации процессов на заводах;

– Снижение трудоемкости работ на строительной площадке;

– Возможность возведения конструкций в зимних условиях без использования специальных методов зимнего бетонирования;

– Высокая скорость возведения зданий;

– Повышенное качество и однородность свойств конструкций.

Недостатки сборного железобетона:

– Дополнительные расходы на транспортирование конструкций, в особенности – длинномерных;

– Дополнительный расход металла на закладные детали;

– Меньшая жесткость конструкций по сравнению с монолитными;

– Необходимость производства большого объема сварочных работ и заделки стыков и швов.

Способы организации производства сборных железобетонных конструкций

1. Агрегатно-поточный – характеризуется расчленением технологического процесса на отдельные операции или их группы, выполнением нескольких разнотипных операций на универсальных агрегатах, наличием свободного ритма в потоке, перемещением изделия от поста к посту. Формы и изделия переходят от поста к посту с произвольным интервалом, зависящим от длительности операции на данном рабочем месте. Изделия перемещаются подъемно-транспортными и транспортными средствами. Таким способом изготавливают сваи, ригели, фундаментные блоки, трубы, многопустотные панели и др.

2. Конвейерный способ предполагает максимальное расчленение технологического процесса на операции, выполняемые на отдельных рабочих постах, перемещение форм и изделий от поста к посту с регламентированным ритмом. Изделия перемещаются конвейерным устройством пульсирующего действия автоматически. Характеризуется принудительным ритмом. Это требует применения комплексной механизации и автоматического технологического оборудования. Таким способом изготавливают, главным образом, стеновые панели.

3. Стендовый способ. Процесс производства осуществляется в неподвижных формах или на специальных стендах; изделия в процессе производства остаются неподвижными, а рабочее место и технологическое оборудование перемещается от одной формы к другой. Данным способом производят, в основном, крупногабаритные конструкции.

Разновидностью стендового способа является **кассетный способ**, суть которого заключается в том, что формование изделий происходит в вертикальном положении в стационарных разъемных групповых металлических формах-кассетах, в которых изделия находятся до приобретения бетоном заданной прочности. Данным способом изготавливают внутренние стеновые панели, плиты перекрытий, балконные плиты и др.

3. СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАСТВОРЫ

3.1. Общие сведения

Строительный раствор – это рационально составленная и однородно перемешанная смесь неорганического вяжущего, воды, мелкого заполнителя (песка) и, в необходимых случаях, добавок, затвердевающая со временем в камневидное состояние. Пластично-вязкую смесь этих компонентов до затвердевания обычно называют «растворная смесь», а образовавшийся из нее искусственный камень – «затвердевший раствор» или для краткости – «раствор».

Применение растворных смесей имеет определенные технологические особенности. Обычно их укладывают или наносят тонким слоем без интенсивного механического уплотнения на пористое основание (кирпич, бетон, в том числе ячеистый), способное активно впитывать воду. При значительной потере воды смесь становится неудобообрабатываемой, а у затвердевшего раствора снижается прочность и ухудшается сцепление с основанием. Поэтому:

– в растворе отсутствует крупный заполнитель с зернами более 5 мм;

– для того, чтобы получить слой растворной смеси как можно тоньше, а лицевую поверхность более гладкой, песок для раствора применяют мельче, чем для бетона, и часто вместе с наполнителем;

– в растворную смесь для смягчения отрицательного влияния отсоса воды вводят пластифицирующие и водоудерживающие добавки.

В соответствии с ГОСТ 28013 строительные растворы классифицируют по основному назначению, используемому вяжущему и средней плотности.

По назначению строительные растворы подразделяют на кладочные, облицовочные, штукатурные и специальные: гидро- и теплоизоляционные, огнезащитные, акустические и др.

Растворы различного назначения чаще всего используют для создания на поверхности конструкций выравнивающего слоя, выполняющего также защитные и/или декоративные функции.

Растворы весьма схожи по технологии нанесения и разравнивания смеси, а различаются целью устройства и, следовательно, требованиями к их строительно-техническим свойствам. Заданные свойства раствора обеспечиваются обоснованным выбором исходных материалов, назначением оптимального состава смеси, введением в нее специальных (модифицирующих) добавок.

В зависимости от применяемого вяжущего растворы подразделяют на:

– простые – на вяжущем одного вида (цементные, известковые и др.);

– сложные – на смешанных вяжущих: на основе двух или более различных вяжущих при содержании каждого не менее 20 % (цементно-известковые, известково-гипсовые и др.). Первым указывается вяжущее, содержащееся в большем количестве.

Наряду с основным назначением вид используемого вяжущего указывают в наименовании раствора, например, при его заказе.

По плотности в сухом состоянии (D, кг/м^3) различают растворы:

– тяжелые с плотностью 1500 кг/м^3 и более, получаемые с применением плотных песков, например природного кварцевого;

– легкие с плотностью менее 1500 кг/м^3, в которых используют пористые заполнители (керамзитовый и вспученный перлитовые пески, дробленую пемзу и др.). Разновидностью легких являются поризованные растворы, получаемые за счет введения в смесь газообразующих добавок.

В зависимости от содержания вяжущего различают жирные и тощие растворы. Жирными называют растворы с большим расходом вяжущего (обычно составов 1:(1…3)), а тощими – с малым расходом (составов 1:(4…6) и более)).

Жирные растворы отличаются слитным строением и высокой пластичностью смеси, но при твердении и последующем высыхании они дают значительную усадку и могут растрескиваться при нанесении толстым слоем.

Недостаточное количество вяжущего в тощих растворах сказывается на пластичности и затрудняет работу с ними. Однако они дают малую усадку и обладают высокой трещиностойкостью. Для улучшения структуры в тощие составы вводят тонкодисперсные наполнители или используют смешанные вяжущие (например, цементно-известковое).

По степени готовности к использованию различают растворные смеси:

– готовые к применению, которые либо доставляют в пластично-вязком состоянии с растворного узла или завода («товарные смеси»), либо готовят в построечных условиях дозированием и перемешиванием вяжущего, песка и воды;

– сухие, изготовленные на специализированных предприятиях в сухом, рыхло-сыпучем виде и для приведения в рабочее состояние перед применение требующие смешивания с водой или водными растворами добавок.

3.2. Исходные материалы: заполнители, наполнители, добавки

Заполнители и наполнители в строительных растворах – это природные или полученные искусственно сыпучие каменные материалы, состоящие из зерен, размер которых находится в пределах, установленных нормативными документами. Преимущественный размер зерен заполнителя – более 0,16 мм, а наполнителя – менее 0, 16 мм. Основное назначение этих компонентов – обеспечить получение плотного раствора требуемых свойств при минимальном содержании вяжущего.

Заполнитель и наполнитель могут занимать до 80 % общего объема раствора. Стоимость обычных заполнителей и большинства наполнителей ниже стоимости вяжущего. Следовательно, чем их в растворе больше, тем раствор дешевле. Кроме того, заполнитель и наполнитель снижают усадочные деформации и повышают трещиностойкость раствора. Также эти компоненты во многом определяют эксплуатационные свойства раствора. Например, используя в качестве заполнителя дробленую пемзу или вспученные шлаки, получают легкие растворы, отличающиеся высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами.

Заполнители и наполнители для растворов должны отвечать следующим общим требованиям:

– иметь оптимальный зерновой состав (содержание зерен разного размера), чтобы объем пустот был минимальным, т. е. чтобы пустоты между крупными зернами были заняты более мелкими;

– форма зерен и характер поверхности должны обеспечивать хорошее сцепление с твердеющим вяжущим, т. е. желательны уг-

ловатые зерна с шероховатой поверхностью, на которой не должно быть мельчайших частиц глины и пыли;

– в их составе не должны содержаться вредные примеси, отрицательно влияющие на твердение вяжущего, а также на прочность и долговечность затвердевшего раствора.

В качестве заполнителей в растворах используют пески различного происхождения, состоящие из зерен размером от 0,16 до 5,0 мм. По происхождению пески бывают:

– природные, добываемые в карьерах и подвергаемые при необходимости рассеву, промывке и сушке. К этой группе также относят пески, получаемые из отсевов дробления горных пород на щебень;

– искусственные, получаемые из промышленных отходов (металлургических шлаков, зол и шлаков теплоэлектростанций и т. п.) или специальной обработкой природного сырья (обжигом из глины получают керамзит, а из перлита – вспученный перлит).

Для улучшения зернового состава природный песок обогащают или фракционируют. Обогащение заключается в отсеивании с помощью специального обогатительного оборудования тех фракций, которые оказались в избытке. При фракционировании песок разделяют по крупности зерен на две части или более, а затем полученные фракции смешивают в оптимальном соотношении, устанавливаемом строительной лабораторией. Обогащение, фракционирование, также как и промывку, целесообразно производить на месте добычи песка.

По плотности зерен пески подразделяют на плотные (тяжелые) с плотностью 2,0…2,8 г/см^3 и пористые (легкие), имеющие пористую структуру и плотность менее 2,0 г/см^3.

Пористые пески применяют для получения легких растворов, обладающих улучшенными тепло- и звукоизоляционными, а в отдельных случаях и огнезащитными характеристиками. Основным показателем качества пористых песков является марка, устанавливаемая в зависимости от насыпной плотности, выраженной в кг/м^3, например, марка 500 означает, что насыпная плотность заполнителя составляет свыше 400 и до 500 кг/м^3 включительно.

К природным пористым заполнителям относятся пески, получаемые дроблением и последующим рассевом пористых горных пород (пемзовый, карбонатный из ракушечника и др.). Ис-

кусственные пористые заполнители – керамзитовый, аглопоритовый, вспученные перлитовый и вермикулитовый пески, а также пески из пористых шлаков.

Наполнители представляют собой тонкодисперсные минеральные порошки, состоящие из частиц с преобладающим размером от 0,03 до 0,16 мм, т. е. соизмеримых с частицами вяжущего. Обычно как наполнители, так и заполнители не вступают в химическое взаимодействие с другими компонентами раствора.

Использование наполнителей преследует различные цели. В растворы общего назначения наполнители вводят для минимизации пустотности смеси заполнителя и наполнителя. Тонкодисперсные наполнители повышают водоудерживающую способность растворной смеси и ее устойчивость против расслоения, уплотняют структуру и уменьшают размер пор в затвердевшем растворе. Введение наполнителя приводит к удешевлению раствора за счет частичной замены дорогостоящего вяжущего более дешевым местным материалом.

Наполнители обычно вводят в количестве 5…20 % массы вяжущего. Увеличение дозировки более 20 % вызывает существенное повышение водосодержания смеси и, как следствие, снижение долговечности раствора. Для уменьшения водопотребности в состав смесей с повышенным количеством наполнителя рекомендуется вводить пластифицирующие добавки поверхностно-активных веществ.

Для направленного регулирования технологических свойств растворной смеси и строительно-технических свойств затвердевшего раствора, а также для уменьшения расхода вяжущего в состав раствора могут вводиться добавки различного назначения. Добавки органических и минеральных веществ вводят в строго определенном количестве в процессе приготовления растворной смеси. Оптимальное количество добавок устанавливают опытным путем при лабораторном подборе состава раствора.

Для строительных растворов используют те же добавки, что и при производстве бетонов. Добавки в соответствии с ГОСТ 24211 разделяют в зависимости от основного эффекта действия на следующие классы:

– добавки, регулирующие свойства смесей;

– добавки, регулирующие свойства растворов и бетонов;

– добавки, придающие растворам и бетонам специальные свойства;

– минеральные добавки.

Добавки, отнесенные к первым трем классам, вводятся в смеси в небольшом количестве (0,1…5,0 % массы цемента). Их принято называть химическими или модифицирующими, т. е. изменяющими в нужном направлении свойства растворной смеси и раствора.

Добавки, регулирующие свойства растворных смесей, делят на пластифицирующие и суперпластифицирующие, стабилизирующие, регулирующие сохраняемость подвижности и увеличивающие воздухо- или газосодержание.

Для регулирования подвижности в цементных растворах наряду с химическими добавками традиционно используют минеральные добавки-пластификаторы: известь и глину.

К добавкам, регулирующим свойства растворов и бетонов, относят ускоряющие или замедляющие процесс твердения, повышающие прочность, морозостойкость, коррозионную стойкость и др.

К добавкам, придающим растворам и бетонам специальные свойства, относятся противоморозные и гидрофобизирующие добавки.

Химические добавки, улучшая одни характеристики растворной смеси и раствора, другие не изменяют или изменяют в нежелательном направлении. Например, пластификаторы, повышая подвижность и жизнеспособность смеси, могут вызвать недопустимое снижение ранней прочности раствора.

Для устранения нежелательных побочных эффектов монодобавок используют комплексные добавки, состоящие из двух и более самостоятельных компонентов. Комплексные добавки полифункциональны и способны регулировать в нужном направлении сразу несколько наиболее важных характеристик раствора.

При использовании комплексных добавок могут возникать проблемы с совместимостью их компонентов. В этом случае отдельные компоненты вводят раздельно с перемешиванием смеси в несколько этапов. Для решения этой проблемы комплексные многокомпонентные добавки стали производить в заводских условиях в виде товарной продукции, не изменяющей своих свойств при транспортировании и хранении.

Минеральные добавки представляют собой дисперсные неорганические вещества природного или техногенного происхождения. Их вводят в количестве 5…20 % и более для экономии клинкерной части цемента, получения плотного раствора при малых расходах вяжущего и повышения стойкости. В зависимости от характера взаимодействия с продуктами гидратации цемента добавки делят на активные минеральные, обладающие вяжущими свойствами и/или пуццолановой активностью, и инертные. Активные минеральные добавки используют при производстве соответствующих разновидностей портландцемента. Инертные тонкодисперсные продукты вводят в растворы в качестве наполнителя.

3.3. Свойства строительных растворов

Качество строительных растворов оценивают по совокупности нормируемых свойств растворной смеси и затвердевшего раствора. Растворная смесь должна быть удобоукладываемой и обладать высокой водоудерживающей способностью, чтобы легко распределяться по пористому основанию и не давать ему отсасывать в себя воду. Кроме того, при транспортировании смесь должна оставаться однородной – не расслаиваться.

Удобоукладываемость – свойство растворной смеси легко распределяться на поверхности сплошным тонким слоем; количественно характеризуется подвижностью смеси. **Подвижность** оценивают по глубине погружения в нее стандартного конуса массой 300 г, высотой 150 мм и углом при вершине 30°.

В зависимости от глубины погружения конуса растворные смеси подразделяют на марки по подвижности:

Марка по подвижности	Глубина погружения конуса, см
$П_к$ 1	от 1 до 4 включительно
$П_к$ 2	от 4 до 8 включительно
$П_к$ 3	от 8 до 12 включительно
$П_к$ 4	от 12 до 4 включительно

Требуемую подвижность смеси устанавливают с учетом назначения раствора и способа производства работ. Например, смеси для перекачивания по трубопроводам должны иметь марку $П_к$ 4, а для вибрированной бутовой кладки – $П_к$ 1.

Водоудерживающая способность – это свойство растворной смеси сохранять воду в количестве, достаточном для твердения вяжущего при нанесении на пористое основание или при транспортировании. Водоудерживающую способность характеризуют остаточной массой пробы смеси, выдержанной в течение 10 мин. на стопке из 10 листов фильтровальной бумаги, в % от первоначальной массы. Согласно требованиям стандарта, водоудерживающая способность должна быть не менее 90 %, а для глиносодержащих смесей – не менее 93 %.

Склонность смесей к расслоению характеризуют расслаиваемостью, которая при испытании свежеприготовленных растворных смесей не должна превышать 10 %. Расслаиваемость оценивают процентным соотношением разности и суммы содержания песка в нижней и верхней половинах слоя смеси толщиной 150 мм после вибрирования на лабораторной виброплощадке в течение 1 мин. Количество песка в пробах определяют мокрым рассевом на сите с сеткой № 0,16.

Общими техническими требованиями к строительным растворам различного вида согласно ГОСТ 28013 являются прочность на сжатие, морозостойкость и средняя плотность. Нормируемые показатели свойств затвердевшего раствора должны быть обеспечены в проектном возрасте. За проектный возраст для растворов на всех видах вяжущих, кроме гипсосодержащих, обычно принимают 28 сут. При применении в растворах гипсовых вяжущих проектный возраст составляет 7 сут.

Прочность на сжатие растворов характеризуют **маркой.** Стандартом предусмотрены следующие марки: М4, М10, М25, М50, М75, М100, М150 и М200. Марку по прочности задают и контролируют для всех видов растворов. Марку устанавливают по пределу прочности на сжатие образцов-кубов с ребром 70,7 мм, изготовленных из растворной смеси рабочей консистенции.

Морозостойкость растворов, предназначенных для наружных работ, характеризуют соответствующими марками: *F*10, *F*15, *F*25, *F*35, *F*50, *F*75, *F*100, *F*150 и *F*200. Морозостойкость не назначается и не контролируется для растворов марок по прочности М4 и М10, а также приготовленных без использования гидравлических вяжущих. Марку по морозостойкости определяют испытанием по наибольшему количеству циклов попеременного

замораживания и оттаивания водонасыщенных образцов до потери ими 25 % первоначальной прочности или 5 % массы.

Для легких растворов в нормативных документах может устанавливаться требуемое значение плотности, например *D*800, в состоянии естественной влажности или в каком-либо нормированном влажностном состоянии. Плотность обычно рассматривается как косвенная характеристика теплопроводности и может ограничиваться для теплоизоляционных штукатурных растворов на пористых песках.

Для отделочных растворов чрезвычайно важна совместная работа слоя штукатурки или клеевой прослойки и основания. Важнейшие требования к таким растворам – это высокая прочность сцепления (адгезия) с основанием и малая усадка при твердении и последующем высыхании.

Впервые единая методика оценки прочности сцепления раствора с основанием для цементных растворов, приготовленных из сухих смесей приведена в ГОСТ 31356. Для получения сопоставимых данных об адгезионной способности различных растворов в стандарте предложено при проведении испытаний использовать одно и то же основание – эталонную бетонную плиту. Плита с размерами не менее 300х150х40 мм должна быть изготовлена из тяжелого бетона класса прочности В20 или выше с водопоглощением не более 6 %. Рабочая поверхность плиты по виду и количеству дефектов должна соответствовать категории А3.

В результате испытания находят усилие, вызывающее отрыв образца затвердевшего раствора от основания. Образцы формуют в виде цилиндров с диаметром основания 50 мм и высотой 3…10 мм из испытываемой смеси требуемой подвижности. Изготавливают образцы на бетонной плите с использованием металлического трафарета толщиной от 3 до 10 мм и имеющего не менее пяти круглых сквозных отверстий, в которые укладывается растворная смесь.

Состав строительного раствора подбирают исходя из требуемых марок по прочности и подвижности смеси с учетом назначения раствора, условий производства работ и характеристик исходных материалов. Составы растворов низких марок (до М50 включительно) подбирают, корректируя ориентировочные составы, приведенные в справочных изданиях, например в СП 82-101-98 "Приготовление и применение растворов строительных".

Состав раствора выражают количеством исходных материалов для получения 1 $м^3$ растворной смеси или соотношением сухих компонентов (по массе или объему); при этом расход основного вяжущего принимают за 1. Например, состав растворной смеси, в которой на 1 ч. цемента приходится 0,7 ч. извести и 6 ч. песка, записывается 1,0:0,7:6,0.

Растворы изготавливают непосредственно на строительном объекте в растворосмесителях или доставляют к месту использования в виде пластичных смесей, приготовленных на автоматизированных растворных заводах или узлах. Процесс приготовления смеси в построечных условиях складывается из дозировки исходных материалов (по массе или по объему), загрузки их в барабан растворосмесителя и перемешивания до получения однородной массы. Чаще используются растворосмесители периодического действия с принудительным перемешиванием. Для обеспечения однородности смеси ограничивают минимальное время перемешивания, например, для тяжелых растворов не менее 3 мин.

При больших объемах работ смеси, как правило, приготовляют на централизованных растворных узлах. Товарную растворную смесь предприятие-изготовитель должно сопровождать документом о качестве, в котором, в частности, содержится условное обозначение поставляемого раствора. Пример условного обозначения тяжелого раствора, готового к употреблению, штукатурного, на цементно-известковом вяжущем, марки по прочности М50 и по подвижности $П_к$ 3:

Раствор штукатурный, цементно-известковый, М50, $П_к$ 3 ГОСТ 28013-98.

3.4. Общие сведения о сухих строительных смесях и их преимущества

Начиная с середины 90-х годов прошлого века отечественные строители для приготовления растворных смесей, необходимых при строительстве, реконструкции и ремонте зданий и сооружений, все шире применяют сухие строительные смеси заводского приготовления. Массовое применение сухих смесей является общемировой тенденцией. Например, в Германии около 90 % общего объема используемых строительных растворов готовятся из сухих смесей.

Смеси сухие строительные – смесь сухих компонентов вяжущего (минерального, полимерного или смешанного), заполнителя и добавок, дозированных и перемешанных на заводе, затворяемая водой перед употреблением.

На место производства строительных работ ССС доставляются в расфасованном виде. При затворении сухой смеси определенным количеством воды она становится растворной (бетонной) смесью, которая с течением времени теряет свою подвижность и образует раствор (бетон). В некоторых случаях в качестве жидкости затворения используют водные дисперсии полимеров.

По сравнению с растворными смесями традиционного приготовления сухие смеси и растворы из них имеют ряд неоспоримых преимуществ:

– смеси в сухом состоянии можно долго хранить и транспортировать без потери качества, в том числе при отрицательной температуре;

– приготавливать растворную смесь можно в строго необходимом, даже весьма малом, количестве, что особенно важно при отделочных работах;

– при приготовлении в заводских условиях обеспечивается высокая стабильность состава сухой смеси и, как следствие, высокая однородность свойств растворных смесей из затвердевшего раствора.

Идея сухих смесей не нова. Первоначально они представляли собой простейшие цементно-песчаные смеси с тонкодисперсной минеральной добавкой (известью, золой ТЭС и др.). Универсальные смеси марок М50, …, М150 выпускались расфасованными в бумажные многослойные мешки, и их применяли для кладочных, штукатурных и облицовочных работ. В смесях использовался отсеянный и высушенный песок, что обеспечивало длительное хранение сухой смеси и облегчало приготовление растворной смеси. Но в современном понимании термин "сухая строительная смесь" к этим составам может быть применен достаточно условно. Сегодня сухими строительными смесями принято называть приготовленные в заводских условиях оптимизированные по составу смеси вяжущих веществ, заполнителей, наполнителей и в обязательном порядке модифицирующих добавок различного назначения. Во избежание терминологической путаницы современные многокомпонентные смеси часто называют модифицированными.

Введение различных модифицирующих добавок в разных сочетаниях и количестве позволяет производителям сухих смесей целенаправленно и в широких пределах изменять технологические свойства приготовленных из них растворных смесей и эксплуатационные свойства затвердевших растворов. В результате модифицированные сухие смеси характеризуются высокой степенью специализации и составляют широкую номенклатуру составов, предназначенных практически для любого вида строительных и отделочных работ.

В 2013 г. объем производства модифицированных сухих смесей в России превысил 10 млн. т и имеет устойчивую тенденцию к повышению (при годовом приросте в 2011-2013 гг. на 11−13 %). При этом доля импортной продукции не превышает 10−12 % отечественного рынка сухих смесей. Общее число фирм-производителей на территории РФ составляет 220-230. К наиболее популярным сухим смесям относятся смеси торговых марок КНАУФ, ВЕТОНИТ, ОСНОВИТ, ЮНИС, БИРСС, ВОЛМА и др. Ассортимент их продукции включает до 100 и более наименований различных смесей, каждая из которых индивидуальна по составу, обладает только ей присущим набором свойств и предназначена для выполнения определенного вида работ.

3.5. Особенности состава и производства сухих смесей

Основными компонентами модифицированных сухих смесей являются минеральное вяжущее, заполнитель, наполнитель, полимерный модификатор вяжущего (иногда выступающий в роли самостоятельного вяжущего), регуляторы технологических свойств растворных смесей (пластификаторы, водоудерживающие, пеногасящие, тиксотропные добавки), ускорители и замедлители схватывания и твердения, противоморозные, гидрофобизирующие и другие добавки.

Вид используемого вяжущего определяется условиями применения сухой смеси – для наружных или внутренних работ. Основой большинства рецептур является портландцемент. Чаще применяют бездобавочные, быстротвердеющие и высокопрочные цементы марок 500 и выше. При необходимости используют белый и цветные цементы.

В смесях для внутренних работ – штукатурных, шпатлевочных и др. – имеют преимущества и все шире применяются гипсовые вяжущие вещества.

В качестве минеральных компонентов, дополняющих основное вяжущее, используют гашеную известь и активные кремнеземистые добавки. Гидратная известь играет роль неорганического пластификатора, улучшающего удобоукладываемость смеси, и дополнительного вяжущего. В смесях на гипсовых вяжущих, кроме пластифицирующего действия, известь замедляет сроки схватывания.

Активные гидравлические добавки, например микрокремнезем, химически связывая $Ca(OH)_2$ твердеющего цемента, повышают плотность, прочность и коррозионную стойкость затвердевшего раствора.

В качестве заполнителя и наполнителя используют традиционные для обычных растворов кварцевый песок различной крупности, пористые перлитовый и вермикулитовый пески, известняковую и доломитовую муку, молотый мрамор (микрокальцит) и др. Но так как к растворам из сухих смесей предъявляются повышенные требования, подготовка заполнителей – подбор оптимального зернового состава, промывка, сушка – производятся более тщательно. Наибольшую крупность зерен заполнителя назначают в зависимости от особенностей применения данной смеси, главным образом, от толщины наносимого слоя.

Особым видом наполнителя являются микроволокна как минерального происхождения (рубленные стекловолокно и базальтовое волокно), так и органические – целлюлозные, полипропиленовые и др. Их добавляют в небольшом количестве для повышения формоустойчивости растворных смесей, трещиностойкости и прочности при изгибе готового покрытия.

В сухих смесях на долю добавок-модификаторов приходится 2…5 % массы смеси, но число добавок может доходить до 5…7 и более. Добавки в сухие смеси вводят в виде водорастворимых порошков и гранул, отвечающих следующим требованиям:

– должны быть сухими и негигроскопичными;

– должны легко распределяться в смеси при сухом перемешивании компонентов и быть к ним химически устойчивыми;

– должны быть быстрорастворимыми или быстродиспергируемыми: при затворении сухой смеси водой время перехода добавки в рабочее состояние не должно превышать 2…10 мин.

В ряде случаев оказалось возможным для приготовления сухих смесей использовать традиционные добавки для бетонов и растворов. В качестве примера можно привести разжижитель С-3, позволяющий улучшить перерабатываемость смесей и повысить прочность готового покрытия.

Однако наиболее важные модификаторы, применяемые практически во всех сухих смесях, таких как редиспергируемые полимерные порошки (РПП) и водорастворимые эфиры целлюлозы, были специально разработаны для применения в сухих строительных смесях.

По химическому составу РПП представлены сополимерами винилацетата с этиленом, акрилатом и т. д. Содержание полимерного модификатора в сухих смесях на цементных и гипсовых вяжущих составляет 0,5…2,5 % массы смеси. После затворения сухой смеси водой РПП немедленно начинает переходить в дисперсное состояние и положительно влиять на свойства растворной смеси, например, повышать фиксирующую способность на вертикальной поверхности.

Во время твердения смеси вследствие связывания воды гидратирующимся цементом и естественного высыхания частицы РПП образуют новую полимерную фазу в виде пленок как внутри самого раствора, так и на границе твердеющего раствора и основания. Именно эти эластичные полимерные пленки обеспечивают повышенную адгезию и другие ценные свойства растворов из сухих смесей: повышенную деформативность, прочность при изгибе, водонепроницаемость.

Формирование полимерных пленок возможно при температуре выше определенного значения, называемого минимальной температурой пленкообразования, различной для разных полимеров. Поэтому если в инструкции по применению смеси указывается минимальная температура использования (например, не ниже 5°С), это требование должно неукоснительно выполняться.

Водорастворимые эфиры целлюлозы, например метилцеллюлозу в количестве 0,3…1 % массы сухой смеси, используют для повышения водоудерживающей способности и связности высокопластичных растворных смесей. При их введении также удлиняется открытое время клеевых составов. Действие добавки основано на образовании аква-комплексов, прочно удерживающих

воду и препятствующих расслоению и обезвоживанию смесей. Эффективность водоудерживающей добавки зависит от ее количества и толщины нанесения растворной смеси: чем толще слой, тем меньше метилцеллюлозы требуется для обеспечения благоприятных условий начального твердения цемента.

В России редиспергируемые полимерные порошки, модифицированные эфиры целлюлозы, порошкообразные антивспенивающие добавки и целлюлозные микроволокна пока не производятся. Эти продукты строительной химии импортируются, что объясняет достаточно высокую себестоимость сухих смесей, особенно с повышенным содержанием добавок-модификаторов, например высокоадгезионных эластичных клеевых смесей.

Производство сухих смесей при кажущейся простоте – однородно перемешать отмеренные в определенном количестве компоненты – имеет ряд узких мест, которые кроются в деталях и в тщательности выполнения операций.

Трудность подготовки заполнителей и наполнителей заключается в необходимости подобрать оптимальный по межзерновой пустотности фракционный состав и обеспечить отсутствие вредных для конечного продукта примесей, например глинистых частиц в кварцевом песке.

Главная трудность – обеспечить точное дозирование и равномерное распределение основных компонентов и добавок, вводимых в количестве часто менее 1 %, с требуемой точностью дозировки до 0,05 % массы вяжущего. Трудность этой задачи не только в малом количестве добавок, но и в разной плотности минеральных и органических компонентов.

И, наконец, на всех этапах производства исходные материалы, полуфабрикаты и готовая сухая смесь должны быть защищены от увлажнения, так как и минеральные вяжущие, и полимерные модификаторы чувствительны к влаге. При увлажнении они комкуются и теряют свои свойства.

3.6. Разновидности сухих строительных смесей

Сухие строительные смеси классифицируют в соответствии с ГОСТ 31189-2015, введенном в действие с 1 октября 2015 г. Основные классификационные признаки: условия применения, вид вяжущего вещества, наибольшая крупность зерен заполнителя,

функциональное назначение, способ нанесения растворной смеси, готовой к использованию.

По условиям применения сухие смеси делят на предназначенные для наружных работ и предназначенные для внутреннего использования.

По виду применяемого вяжущего сухие смеси подразделяют на цементные, гипсовые, известковые, магнезиальные, полимерные, в которых используются полимеры и сополимеры различного химического состава, и смешанные. К смешанным относят вяжущие, представляющие собой рационально составленную и смешанную в заводских условиях композицию минерального и полимерного вяжущих.

В зависимости от наибольшей крупности зерен заполнителя сухие смеси подразделяют на растворные с зернами размером менее 5 мм и бетонные, содержащие зерна крупнее 5 мм. В свою очередь, растворные смеси делят на крупнозернистые, мелкозернистые и тонкодисперсные с наибольшей крупностью зерен менее, соответственно, 5, 1,25 и 0,2 мм.

По назначению смеси подразделяют на кладочные, штукатурные, шпаклевочные, клеевые, затирочные или шовные, напольные, ремонтные, изоляционные и специальные, включающие защитные, реставрационные и санирующие. В отдельную группу выделены сухие смеси, используемые для фасадных теплоизоляционных композиционных систем с наружными штукатурными слоями (СФТК).

Кладочные сухие смеси предназначены для скрепления штучных изделий при возведении стен и перегородок. В зависимости от толщины наносимого слоя растворной смеси их делят на толстослойные (более 5 мм) и тонкослойные (до 5 мм).

Штукатурные сухие смеси используют для создания на поверхности строительных конструкций слоя из растворной смеси, наносимой с целью выравнивания и подготовки поверхности к финишной отделке, а также для защиты от атмосферных воздействий. Штукатурные смеси могут применяться также для придания строительным конструкциям теплозащитных и декоративных свойств. В зависимости от средней плотности штукатурные смеси делят на тяжелые (более 1300 кг/м^3), легкие (менее 1300 кг/м^3) и особо тяжелые (более 2300 кг/м^3).

К клеевым относят сухие смеси, предназначенные для укладки штучных облицовочных изделий и монтажа листовых и плитных изделий, например гипсокартонных и гипсоволокнистых листов.

Напольные объединяют сухие смеси для устройства стяжек, выравнивающих слоев (прослоек) и покрытий – верхнего слоя пола, непосредственно подвергающегося эксплуатационным воздействиям. По способу укладки напольные сухие смеси бывают выравниваемые и самовыравнивающиеся, т. е. способные под действием силы тяжести распределяться по поверхности основания, создавая ровные горизонтальные плоскости.

Ремонтные сухие смеси предназначены для восстановления геометрических и эксплуатационных показателей поврежденных бетонных, железобетонных и каменных конструкций. Их делят на поверхностно- и объемно-восстановительные, а также инъекционные, применяемые путем закачивания растворной смеси внутрь ремонтируемой конструкции.

К изоляционным сухим смесям относят гидро-, а также тепло- и звукоизоляционные. Гидроизоляционные смеси предназначены для защиты строительных конструкций от воздействия окружающей среды и, в первую очередь, действующей под давлением воды с растворенными в ней веществами различного происхождения. По способу гидроизоляции смеси делят на поверхностные, инъекционные и проникающие, которые обеспечивают защиту конструкции от проникновения воды за счет заполнения пор и дефектов материала образующимися после их нанесения кристаллами минеральных солей.

По способу нанесения сухие смеси подразделяют на смеси ручного и механизированного нанесения. Последние могут затворяться, транспортироваться к месту производства работ и укладываться или наноситься с использованием специализированного механического оборудования, обеспечивая при этом получение раствора заданных эксплуатационных свойств.

3.7. Оценка качества сухих строительных смесей. Условные обозначения

Качество сухих смесей оценивается по совокупности нормируемых характеристик: смесей в сухом состоянии; смесей, затворенных водой и готовых к применению; затвердевшего раствора в проектном возрасте.

К основным показателям качества сухих смесей отнесены: влажность; зерновой состав, задаваемый в виде наибольшей крупности и содержания зерен наибольшей крупности; насыпная плотность (при необходимости). Влажность смесей не должна превышать 0,2 или 0,3 % по массе в зависимости от вида вяжущего.

Основные нормируемые характеристики смесей, готовых для применения: подвижность, водоудерживающая способность, объем вовлеченного воздуха, а также сохраняемость первоначальной подвижности для цементных смесей и время начала схватывания или продолжительность переработки для гипсовых смесей.

В отличие от обычных растворных смесей для оценки подвижности предлагаются не один, а три различных показателя: погружение конуса $П_к$, см, расплыв конуса РК, мм и расплыв кольца $Р_к$, мм.

Критерий оценки и требуемую подвижность устанавливают в зависимости от назначения и способа применения сухой смеси. Важно, что требуемая подвижность должна быть обеспечена при затворении водой в количестве, установленном производителем и указанном на маркировке.

Водоудерживающая способность смесей должна быть не менее 90 %, а при условии содержания водоудерживающих добавок – не менее 95 %.

Технические требования к затвердевшим растворам весьма разнообразны и зависят от назначения и условий применения смесей. Для большинства смесей (кроме клеевых) основным показателем качества затвердевшего раствора является прочность на сжатие, по которой устанавливается соответствующая марка из параметрического ряда: М5, М10, …, М200, М250 и М300.

Важнейшим требованием к смесям для отделочных работ является минимально допускаемая прочность сцепления с эталонным бетонным основанием. В соответствии с требованиями ГОСТ 31357 и ГОСТ 31358 прочность сцепления затвердевших цементных растворов должна быть не ниже, МПа: 0,8 – для ремонтных смесей; 0,75 – для напольных; 0,5 – для клеевых; 0,4 – для наружных штукатурных; 0,25 – для внутренних штукатурных.

Для смесей, предназначенных для использования во влажных и мокрых помещениях, а также для наружного применения, нормируются водопоглощение и марка по морозостойкости. Смеси

на цементном вяжущем должны иметь водопоглощение растворных образцов при полном погружении в воду на 48 ч не более 8 % по массе. Марки по морозостойкости затвердевших растворов: *F*15, *F*25, …, *F*200, *F*300 и *F*400.

Напольные смеси дополнительно должны иметь определенные прочность на растяжение при изгибе, истираемость и деформации усадки; гидроизоляционные – фиксированную марку по водонепроницаемости и т. д.

В соответствии со стандартными требованиями условное обозначение сухой смеси должно состоять из наименования классификационных признаков согласно ГОСТ 31189, обозначения основных технических показателей и обозначения нормативного документа на данную смесь.

В условном обозначении могут быть опущены: слово "строительная"; слово "цементная" – для сухих смесей на цементном вяжущем; слово "крупнозернистая" – для растворных крупнозернистых сухих смесей; слово "выравниваемая" – для напольных сухих смесей.

Пример условного обозначения сухой штукатурной тяжелой смеси на цементном вяжущем для наружных работ марки по прочности при сжатии М50, марки по морозостойкости *F*35, механизированного нанесения:

Смесь сухая штукатурная тяжелая для наружных работ, М50, *F*35 механизированного нанесения ГОСТ 33083-2014.

3.8. Особенности производства работ при применении сухих строительных смесей и их технико-экономическая эффективность

Сухие смеси могут упаковываться в полиэтиленовые пакеты вместимостью до 8 кг (для розничной торговли) и многослойные бумажные мешки из крафт-бумаги или с полиэтиленовым вкладышем вместимостью до 50 кг. Для крупных потребителей, применяющих механизированные способы выполнения работ, допускается поставка смесей в мягких контейнерах (биг-бэгах), вмещающих 0,5…1,5 т или специализированными силосными контейнерами большой емкости (3…18 т), обеспечивающими защиту от воздействия осадков.

Смеси должны храниться в упакованном виде в крытых складских помещениях с влажностью воздуха не более 60 %. Гарантийный срок хранения смесей в неповрежденной упаковке – 6 мес., а смесей, транспортируемых в силосах, – 3 мес. с даты изготовления.

Приготовление растворных смесей с использованием современных сухих смесей очень технологично: нужно только добавить воду в количестве, указанном изготовителем, и тщательно перемешать смесь по рекомендованному режиму. Однако надо иметь в виду, что заявленные изготовителем свойства продукта могут быть достигнуты при неукоснительном выполнении всех требований инструкции по применению. Не допускается вводить в сухую смесь или готовый раствор какие бы то ни было химические добавки, смешивать продукты различного назначения или однотипные, но разных изготовителей. Добавление воды свыше рекомендуемого количества или любых добавок ведет к непрогнозируемому снижению качества материала.

Особенности приготовления растворных смесей связаны со спецификой диспергирования полимерных порошкообразных модификаторов. Для более быстрого диспергирования рекомендуется энергичное перемешивание, например с помощью профессионального миксера или электродрели с насадкой.

Перемешивают смесь обычно в два приема. Первый – 4…5 мин. Затем для дозревания смеси дают отстояться 5…10 мин. В это время вокруг первичных полимерных частиц формируются водные оболочки, в результате чего модификатор начинает работать в растворной смеси. Затем производится окончательное перемешивание в течение 1–2 мин.

В инструкции по применению любой модифицированной сухой смеси указан интервал рабочих температур, например от +5 до +30 °С, в котором данная смесь обеспечивает заявленные свойства. Только при этих температурах полимерный модификатор перейдет в пленочную форму и образует дополнительные связи внутри затвердевшего раствора и на границе отделочного слоя и основания.

При использовании растворной смеси надо строго следовать указаниям изготовителя относительно рекомендуемой и максимальной толщины нанесения состава. Недопустимо нанесение толстым слоем (10 мм и более) смеси с высоким содержанием эфира целлюлозы, предназначенной для тонкослойного исполь-

зования. В этом случае может проявиться «эффект карамели», когда поверхность слоя отвердевает нормально, а внутри сохраняется незатвердевший раствор.

Расширение производства узкоспециализированных сухих смесей связано с необходимостью увеличить производительность труда строителей, снизить материалоемкость и повысить качество строительных объектов.

С появлением специальных сухих смесей для машинного нанесения и оборудования для их использования стали применяться механизированные технологии строительных и отделочных работ. Полная схема механизации включает доставку смесей на объект и их хранение в силосных контейнерах большой емкости, подачу сыпучего материала к месту работ с использованием пневмотранспортной системы, приготовление и нанесение растворной смеси на основание с помощью мобильной растворосмесительной станции.

Наиболее часто механизированные технологии применяются для штукатурных работ, устройства выравнивающих стяжек и наливных полов, а также при устройстве фасадных систем утепления "мокрого" типа. Производительность труда отделочников при этом повышается в 3…5 раз в зависимости от вида работ и степени механизации. Кроме того, уменьшается себестоимость одного $м^2$ готовой поверхности и сокращаются сроки выполнения отделочных работ.

Благодаря высокой водоудерживающей способности модифицированных сухих смесей появились тонкослойные технологии нанесения растворных смесей: тонкие штукатурки, составы для облицовочных работ и кладки высокоточных стеновых изделий, самовыравнивающиеся стяжки для полов. В этом случае расход основных материалов снижается в 3-4 раза и более.

Применение сухих смесей наряду с повышением производительности труда и снижением расхода растворной смеси обеспечивает получение готовых покрытий высокой долговечности с заданными эксплуатационными свойствами. Повышенная долговечность является одним из решающих факторов экономической эффективности использования модифицированных сухих смесей, в результате чего удлиняется межремонтный период и соответственно снижаются эксплуатационные расходы.

Контрольные вопросы

1. Что такое неорганические вяжущие вещества?

2. Каким образом классифицируются неорганические вяжущие вещества? Дать характеристику отдельных групп.

3. Как производят воздушную известь? Какие существуют виды воздушной строительной извести? Каковы области применения воздушной извести?

4. Каковы основные показатели качества воздушной строительной извести?

5. В результате каких процессов происходит твердение гашеной и негашеной воздушной извести?

6. Как производят гипсовые вяжущие вещества? Какие существуют разновидности гипсовых вяжущих веществ? Каковы области применения гипсовых вяжущих?

7. Напишите уравнение реакции гидратации строительного гипса.

8. Каковы химический и минеральный составы портландцементного клинкера?

9. Напишите уравнения реакций гидратации основных клинкерных минералов. Для чего в состав портландцемента вводится добавка гипса?

10. Назовите основные показатели качества портландцемента.

11. Назовите основные показатели качества глиноземистого цемента.

12. В чем состоят особенности свойств глиноземистого цемента?

13. Что называют бетоном?

14. Что такое класс бетона по прочности? Как его определить?

15. Как определить удобоукладываемость бетонной смеси по показателям подвижности и жесткости? Каким образом регулируется удобоукладываемость бетонной смеси?

16. Дайте определение сухим строительным смесям. Перечислите их преимущества.

Заключение

Каждый материал имеет название, структуру, показатели качества или свойства, их численные значения, способы производства, условия и особенности применения и т.д. Все это надо знать, чтобы считать себя настоящим строителем.

Концепция безопасности по отношению к строительным материалам означает обеспечение функциональных свойств, экологической чистоты, пожаробезопасности и безвредности материалов в течение всего их срока службы. Это относится к конечной строительной продукции – конструкции, зданиям, сооружениям, которые сделаны из строительных материалов. Поэтому для обеспечения безопасности необходимо знать функциональное назначение, условия эксплуатации конечной продукции при изучении, выборе и разработке строительного материала, что обеспечивает стабильность его показателей во время эксплуатации.

Авторы настоящего пособия надеются, что оно будет полезно не только студентам вузов строительных специальностей и направлений подготовки, но и инженерно-техническим работникам строительной отрасли.

Список литературы

1. Атаев С.С. Технология строительного производства: учебник для ВУЗов / С.С. Атаев, Н.Н. Данилов, Б.В. Прыкин [и др.]. – Москва: «Стройиздат», 1984. – 559 с.
2. Афанасьев А.А. Технология строительных процессов / А.А. Афанасьев, Н.Н. Данилов. – Москва: «Высшая школа», 1997. – 464 с. – ISBN 5-06-003165-9.
3. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение [Текст]: учебное пособие / И.А. Рыбьев. – 4-е изд. – Москва: Юрайт, 2012. – 701 с.
4. Попов К.Н., Каддо М.Б., Кульков О.В. Оценка качества строительных материалов [Текст]: учебное пособие – Москва: Студент, 2012. – 4287 с.
5. Попов К.Н. Строительные материалы [Текст]: учебник для вузов / К.Н. Попов, М.Б. Каддо. – Москва: Студент, 2012. – 440 с.
6. Строительные материалы. Материаловедение. Технология конструкционных материалов [Текст]: учебник для вузов / В.Г. Микульский [и др.]; под общ.ред. В.Г. Микульского, Г.П. Сахарова. – [5-е изд., доп. и перераб.]. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 519 с.
7. ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия».
8. ГОСТ 30515–2013 «Цементы. Общие технические условия».
9. ГОСТ 30744–2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка».
10. ГОСТ 310.4–81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии».
11. ГОСТ 25192–2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования».
12. ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия».
13. ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и строительных растворов».
14. ГОСТ 7473–2010 «Смеси бетонные. Технические условия».

15. ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».
16. ГОСТ 7473–2010 «Смеси бетонные. Технические условия».
17. ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия».
18. ГОСТ 27006–86 «Бетоны. Правила подбора состава».
19. ГОСТ 31360–2024 «Изделия стеновые неармированные из ячеистого бетона автоклавного твердения. Технические условия».
20. ГОСТ 28013–98 «Растворы строительные. Общие технические условия».
21. ГОСТ 24211–2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия».
22. ГОСТ 28013–98 «Растворы строительные. Общие технические условия».
23. ГОСТ 31356–2007 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний».
24. ГОСТ 31189–2015 «Смеси сухие строительные. Классификация».
25. ГОСТ 31357–2007 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия».
26. ГОСТ 31358–2019 «Смеси сухие строительные напольные. Технические условия».
27. ГОСТ 31189–2015 «Смеси сухие строительные. Классификация».
28. ГОСТ 33083–2014 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем для штукатурных работ. Технические условия».

Учебное электронное издание

Пуляев Иван Сергеевич, **Филимонова** Юлия Сергеевна

МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА И МАТЕРИАЛЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Учебное пособие
для студентов, обучающихся по специальности
08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений»
и направлению подготовки 08.03.01 «Строительство», всех форм обучения

Разработано с помощью программного обеспечения
Microsoft Office Word, Adobe Acrobat Pro

Издается в авторской редакции

Ответственный за выпуск *А.В. Куркова*
Компьютерная верстка: *Ю.С. Акульшина*

Подписано к использованию 15.01.2026
Объем издания 2,0 Мб. Тираж 15. Заказ № 74/25

Издательство Московского Политеха
107023, Москва, Большая Семёновская, 38
www.mospolytech.ru; e-mail: izdat.mospolytech@yandex.ru