

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный
университет имени И. Т. Трубилина»

В. К. Широкогородюк

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебное пособие

Краснодар
КубГАУ
2020

УДК 691 (075.8)
ББК 38.3
Ш64

Рецензенты:

В. И. Бареев – канд. техн. наук, профессор
(Кубанский государственный аграрный университет);

В. И. Божков – канд. техн. наук, профессор
(Кубанский государственный технологический
университет)

Широкородюк В. К.

Ш64 Строительные материалы : учеб. пособие /
В. К. Широкородюк. – Краснодар: КубГАУ, 2020. –
86 с.

ISBN 978-5-907373-30-3

В учебном пособии приведена классификация строительных материалов конструкционного и специального назначения. Систематизированы тестовые определения классификационных групп строительных материалов и терминов стандартных свойств.

Предназначено для обучающихся по специальности 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений.

УДК 691(075.8)
ББК 38.3

ISBN 978-5-907373-30-3

© Широкородюк В. К., 2020
© ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный аграрный
университет имени
И. Т. Трубиллина», 2020

ВВЕДЕНИЕ

Развитие строительного комплекса базируется на использовании методов физико-химической механики материалов, математического моделирования структуры строительных материалов, что через строительное материаловедение обеспечивает получение строительных материалов с заданными свойствами. Разработка технологии получения строительных материалов с управляемой структурой обеспечивает получение широкой номенклатуры строительных материалов конструкционного и специального назначения для заданных условий эксплуатации. Главным требованием к материалам, из которых изготовляют **несущие конструкции**, является их способность сопротивляться изменению формы и разрушению под действием эксплуатационных нагрузок (высокая прочность, морозостойкость, коррозионная стойкость, огнестойкость, сейсмостойкость и т. д.).

Для материалов **ограждающих конструкций** зданий основными требованиями являются способность сопротивляться тепло- и звукопередаче (малая плотность, однородность, высокая пористость, паропроницаемость и т. д.).

При строительстве **специальных сооружений** должны соблюдаться главные задачи – обеспечение водо-, газонепроницаемости, пароизоляции, химической или радиационной стойкости (большая плотность, морозостойкость, гидрофобность, коррозионная стойкость).

К **отделочным материалам** в жилых помещениях основные требования – обеспечение комфортности по теплопроводности, звукоизоляции и звукопоглощению (оптимальный характер пористости, прочность, влагостойкость и т. д.).

Курс «Строительные материалы» является базисным для дисциплин программы подготовки «Строительство уникальных зданий и сооружений».

1 КЛАССИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УНИФИКАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

По назначению материалы условно можно разделить на *конструкционные материалы* и *материалы специального назначения*. Конструкционные материалы применяются для получения несущих конструкций. Материалы специального назначения служат для защиты конструкций от вредных воздействий среды эксплуатации, повышения эксплуатационных свойств и создания комфорта.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Конструкционные материалы подразделяются на следующие группы:

1-я группа – **природные каменные материалы** – материалы на основе горных пород и составляющих их минералов;

2-я группа – **вяжущие материалы** – порошкообразные вещества, способные при смешивании с водой образовывать *вяжущее тесто*, которое при твердении образует *вяжущий камень*;

3-я группа – **искусственные каменные материалы**, к которым относятся:

строительный раствор – затвердевшая смесь из трех компонентов: вяжущего, затворителя (вода) и мелкого заполнителя (песок);

бетон – затвердевшая смесь из четырех компонентов: вяжущего, затворителя (вода), мелкого заполнителя (песок) и крупного заполнителя (гравий, щебень);

железобетон – бетон, армированный стальной арматурой в зонах растяжения;

керамика – продукт обжига глинистых пород до получения *керамического черепка* (керамический кирпич, фаянс, фарфор и т. д.);

стекло – продукт резкого переохлаждения *минерального расплава* (стекло оконное, увиолевое, закаленное, зеркальное и т. д.);

ситалл – стекло, армированное минеральными кристаллами (бронированное, аэрокосмическое и т. д.);

4-я группа – **металлы** для строительства (сталь, чугун, алюминий, сплавы и т. д.);

5-я группа – **полимерные материалы**, получаемые на основе высокомолекулярных соединений, используемых в качестве связующего (*термопластичные* и *термореактивные* полимеры);

6-я группа – **материалы растительного и животного происхождения** (древесина, хлопок, кость, шерсть и т.д.);

7-я группа – **композиционные материалы** – соединения материалов выше перечисленных групп (асбоцемент, полимербетон, фибробетон, стеклопластик, металлопластик, древесностружечные плиты *ДСП*, древесноволокнистые плиты *ДВП* и т. д.).

МАТЕРИАЛЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Материалы специального назначения служат для защиты конструкций от вредных воздействий среды эксплуатации, повышения эксплуатационных свойств и создания комфорта.

К ним относятся:

1-я группа – **теплоизоляционные материалы** – материалы, обеспечивающие *термическое сопротивление* тепловому потоку (пенопласты, минераловатные изделия, керамзит, пенобетон и т. д.);

2-я группа – **акустические материалы** – материалы, обеспечивающие сопротивление прохождению *звуковой волны* или ее поглощение (*звукоизолирующие* и *звукопоглощающие* материалы);

3-я группа – **гидроизоляционные материалы** – материалы, обеспечивающие сопротивление *процессу фильтрации*

воды (водонепроницаемые, кровельные, герметизирующие материалы и т. д.);

4-я группа – **отделочные материалы** – материалы, обеспечивающие *эстетическую отделку* строительных конструкций (декоративные строительные растворы, лакокрасочные материалы и т. д.);

5-я группа – **антикоррозионные материалы** – материалы, обеспечивающие *защиту конструкций* от воздействия вредных факторов среды эксплуатации (лакокрасочные материалы, гидрофобные мастики, защитные штукатурные растворы);

6-я группа – **огнеупорные материалы** – материалы, обеспечивающие *защиту конструкций* от вредного воздействия высоких температур;

7-я группа – **особые материалы** – материалы *для защиты* от электромагнитных, радиационных и других воздействий.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УНИФИКАЦИЯ

Определение стандартизации дано Международной организацией по стандартизации *МОС*: «Стандартизация – установление и применение правил с целью упорядочения деятельности в определённой области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон, в частности для достижения всеобщей оптимальной экономии при соблюдении функциональных условий и требований техники безопасности».

Объекты стандартизации – конкретная продукция, нормы, требования, методы, термины, обозначения, имеющие перспективу многократного применения, используемые в науке, технике, промышленном и сельскохозяйственном производстве, строительстве, транспорте, культуре, здравоохранении и других сферах народного хозяйства, а также в международной торговле.

Стандартизация – процесс установления и применения правил в строительстве. Все строительные материалы и изделия, используемые в Российской Федерации, соответствуют

определенным государственным стандартам *ГОСТ*. На каждый вид строительного материала или изделия в государственном стандарте имеются следующие данные:

- точное наименование материала и его назначение;
- классификация материала по маркам и сортам;
- технические условия на изготовление;
- методы испытаний;
- условия хранения и транспортирования.

В обозначении государственного стандарта, например, *ГОСТ 22950–95*, первое число означает порядковый номер стандарта, а второе – год его утверждения или пересмотра.

В зависимости от сферы действия стандарты подразделяют на следующие категории:

государственные стандарты *ГОСТ* – действуют на всей территории Российской Федерации;

отраслевые стандарты *ОСТ* – действуют в системе той или иной отрасли народного хозяйства;

республиканские стандарты *РСТ* – действуют на территории субъекта Российской Федерации;

стандарты предприятий *СТП* – действуют на территории предприятия.

Для новых материалов или изделий, которые по различным причинам не подпадают под требования *ГОСТ*, по аналогичной схеме разрабатываются и действуют **технические условия *ТУ***.

Методическую основу стандартизации размеров в проектировании и изготовления строительных изделий составляет **модульная координация размеров в строительстве *МКРС***.

Модуль (от лат. *modulus* – мера) в архитектуре – условная единица, принимаемая для координации размеров частей здания или комплекса. Возникнув вследствие технической необходимости, модуль стал одним из средств архитектурной композиции, которое использовалось для приведения в гармоническое соответствие размеров целого и его частей (например, *золотое сечение* в античной архитектуре).

В строительстве за основной модуль принят **базовый модуль M размером 10 см**. Производные от него **укрупнённые модули** ($3M$, $6M$, $12M$, $15M$, $30M$, $60M$) и **дробные модули** (от $1/2M$ до $1/100M$) вместе с правилами их применения составляют модульную систему в строительстве. Они установлены отечественными и международными нормами и стандартами.

В строительном комплексе с развитием современных методов технологии строительства линейные модули получили особенно большое техническое значение как средство согласования планировочных и конструктивных элементов зданий, их унификации и стандартизации.

Унификация – это максимальное сокращение типоразмеров всех конструкций, то есть приведение их к минимальному числу стандартных типов и размеров. В соответствии с этим здание разбивается на унифицированные элементы: фундаменты, колонны, стены, проемы, перекрытия и покрытия и т. п.

Унификация конструкций позволяет заменять одни на другие без ущерба качеству строительства. Изделия и детали одинаковых размеров, изготовленные в соответствии с требованиями *МКПС*, используются в зданиях разнообразного назначения, в то же время стандартизация и унификация строительных конструкций составляет основу индустриализации их производства.

Индустриализация – это массовое производство строительных конструкций, обеспечивающее высокую производительность и сокращение стоимости строительства.

Унификация, стандартизация и индустриализация в строительном комплексе базируется на нижеперечисленной нормативно-технической документации:

ЕСКД – единая система конструкторской документации;

ЕСТД – единая система технологической документации;

ГОСТ – государственный стандарт;

ТУ – технические условия;

СН – строительные нормы;

СНиП – строительные нормы и правила – свод нормативных документов по проектированию, производству строительных работ и требования к строительным материалам, обязательные для всех организаций и предприятий.

Контрольные вопросы

1. Группы конструкционных материалов и где они применяются?
2. Группы материалов специального назначения?
3. Для чего служат материалы специального назначения?
4. Стандартизация в области строительных материалов?
5. Унификация в области строительных материалов?
6. Индустриализация в области строительных материалов?
7. Зачем применяют модульную систему?
8. Что относится к композиционным материалам?
9. Какие материалы относят к отделочным?
10. Какие материалы относят к огнеупорным?
11. Какие материалы относят к гидроизоляционным?

2 СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1 Строение и состав материала

Строение материала рассматривают на трех уровнях:

1-й уровень – **макроструктура** – строение материала, видимое невооруженным глазом;

2-й уровень – **микроструктура** – строение материала, видимое через оптический микроскоп;

3-й уровень – **внутреннее строение** – строение веществ, из которых состоит материал, на атомно-молекулярном уровне, изучаемое методами рентгеноструктурного анализа *РСА*, электронной микроскопии *ЭМС*, ядерного магнитного резонанса *ЯМР* и т. д.

МАКРОСТРУКТУРА

Макроструктура материала определяет в основном его механические и физические свойства.

Типы макроструктуры:

рыхлозернистая структура (например, гравий, песок, порошкообразные вяжущие материалы и т. д.) – состоит из отдельных не связанных между собой зерен; характеризуется наличием межзерновой пустотности;

конгломератная (например, строительный бетон, строительный раствор и т. д.) – состоит из связанных между собой зерен сыпучего материала; характеризуется наличием упорядоченной структуры.

ячеистая структура (например, газобетон, пенобетон, пенопласты и т. д.) характеризуется наличием упорядоченной *макро-пористости*;

мелкопористая структура (например, керамический кирпич, керамзит и т. д.); характеризуется наличием упорядоченной *микро-пористости*;

волокнистая структура (например, древесина, минеральная вата и т. д.); особенность волокнистой структуры это *анизотропность* – резкое различие свойств материала от направления воздействия физического фактора (вдоль или поперек волокон);

слоистая структура (например, слюда, фанера, ДСП и т. д.). характеризуется наличием *анизотропности* – резкое различие свойств материала от направления физического воздействия (вдоль или поперек слоев).

МИКРОСТРУКТУРА

Микроструктура материала определяется наличием однородности (*изотропность*) или неоднородности (*анизотропность*) свойств материалов в зависимости от направления физического воздействия.

Типы микроструктуры:

кристаллическая (например, кварцевый песок – кристаллическая форма диоксида кремния SiO_2 ; отличительная особенность кристаллической структуры – строго определенная температура плавления, *различность* прочностных и других свойств в зависимости от направления (вдоль кристалла или поперек его);

аморфная (например, трепел – аморфная форма диоксида кремния SiO_2); особенность аморфного строения – отсутствие определенной температуры плавления, *одинаковость* физико-механических свойств во всех направлениях.

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ

Внутреннее строение строительного материала определяется следующими составляющими: *химическим составом*; *минеральным составом*; *фазовым составом*. Внутреннее строение материала определяет его механическую прочность, твердость, тугоплавкость.

Химический состав строительных материалов характеризуется процентным содержанием в них оксидов. Например, состав портландцемента выражается следующим образом: оксид кальция CaO – 63–66 %; оксид кремния SiO_2 – 21–24 %; оксид алюминия Al_2O_3 – 4–8 %; оксид железа Fe_2O_3 – 2–4 %.

Оксиды химически связаны между собой в более сложные соединения – *минералы*, которые определяют многие свойства материала: огнестойкость, механические и другие показатели.

Минеральный состав показывает, какие минералы и в каком количестве содержатся в материале. Например, минеральный состав портландцемента включает в себя четыре основных минерала:

- трехкальциевый силикат $3CaO \cdot SiO_2 - C_3S$ – 40–65 %;
- двухкальциевый силикат $2CaO \cdot SiO_2 - C_2S$ – 15–40 %;
- трехкальциевый алюминат $3CaO \cdot Al_2O_3 - C_3A$ – 5–15 %;
- четырехкальциевый алюмоферрит $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 - C_4AF$ – 10–20 %.

Фазовый состав компонентов материала характеризуется наличием твердого, жидкого и газообразного состояния.

В материале выделяют вещества, образующие каркас материала (твердая фаза), и поры, которые могут быть заполнены воздухом (газообразная фаза) и водой (жидкая фаза).

В зависимости от фазового состава воды в порах материала и ее количества материал может значительно изменять свои свойства. Например, при наличии *открытой пористости* материал может привлекать (сорбировать) влагу из окружающего воздуха. В порах водяной пар может конденсироваться, превращаясь в воду. При этом резко увеличивается *теплопередача* через конструкцию, так как коэффициент теплопроводности воды $\lambda_{\text{воды}} = 0,58$ Вт/(м·К) в 25 раз превышает коэффициент теплопроводности воздуха $\lambda_{\text{возд}} = 0,023$ Вт/(м·К). При замерзании воды коэффициент теплопроводности льда $\lambda_{\text{л}} = 2,3$ Вт/(м·К) в 4 раза превышает коэффициент теплопроводности воды и в 100 раз превышает коэффициент теплопроводности

воздуха, что еще больше увеличивает теплопередачу через ограждающую конструкцию. Поэтому *фазовый состав* в значительной степени определяет теплофизические свойства материала.

2.2 Физические свойства

ПЛОТНОСТЬ

Плотность материала является его важнейшей универсальной характеристикой состояния.

В общем случае плотность материала ρ – это масса единицы его объема:

$$\rho = m/V, \quad (2.1)$$

где ρ – плотность материала, г/см³;
 m – масса материала, г;
 V – объем материала, см³.

Основные единицы измерения плотности и их соотношение: 1 г/см³ = 1 г/мл = 1 кг/дм³ = 1 кг/л = 1000 кг/м³ = 1 т/м³.

Различаются следующие виды плотности: истинная плотность ρ_u ; средняя плотность ρ_e ; насыпная плотность ρ_n .

Истинная плотность ρ_u – это масса единицы объема материала, который находится в абсолютно плотном состоянии (характеризуется отсутствием пор):

$$\rho_u = m/V_A, \quad (2.2)$$

где ρ_u – истинная плотность материала, г/см³;
 m – масса материала, г;
 V_A – объем материала в абсолютно плотном состоянии, (без пор), см³.

Средняя плотность ρ_e – это масса единицы объема материала, который находится в естественном состоянии:

$$\rho_e = m/V_e, \quad (2.2)$$

где ρ_u – средняя плотность материала, г/см³;
 m – масса материала, г;
 V_e – объем материала в естественном состоянии
(с порами), см³.

Можно получить выражение для средней плотности влажного материала:

$$\begin{aligned}\rho_{BM} &= m_{BM} / V_e = (m_C + m_B) / V_e = m_C / V_e + m_B / V_e = \\ &= \rho_e + (m_B \cdot m_C) / (V_e \cdot m_C) = \rho_e + \rho_e (m_B / m_C); \\ \rho_{BM} &= \rho_e (1 + W),\end{aligned}\tag{2.3}$$

где ρ_{BM} – средняя плотность влажного материала, г/см³;
 m_{BM} – масса влажного материала, г;
 m_{CM} – масса сухого материала, г;
 m_B – масса влаги, г;
 V_e – объем сухого материала в естественном
состоянии, см³;
 ρ_e – средняя плотность сухого материала, г/см³;
 W – влажность материала, доля.

Насыпная плотность ρ_n – это масса единицы объема зернистого материала, который находится в рыхло насыпном состоянии (например, цемент, песок, щебень, гравий):

$$\rho_n = m / V_n,\tag{2.4}$$

где ρ_n – насыпная плотность, г/см³;
 m – масса материала, г;
 V_n – объем материала, в рыхло насыпном состоянии
(с пустотами между зернами), см³.

Относительная плотность d – это отношение плотности материала к плотности воды:

$$d = \rho_e / \rho_{uB},\tag{2.5}$$

где d – относительная плотность, безразмерная величина;

ρ_e – средняя плотность материала, г/см³;

$\rho_{иВ}$ – плотность воды, г/см³ ($\rho_{иВ} = 1$ г/см³).

Следует отметить, что *истинная плотность* для конкретного вида материала только *одна*, поэтому ее значение приводится в справочниках.

Например, для керамики *истинная плотность* имеет справочное значение $\rho_{и} = 2,7$ г/см³, хотя средние плотности керамических материалов (например, керамзит, керамический кирпич, керамическая плитка) весьма различны, но всегда меньше истинной плотности.

Средняя плотность для конкретного вида материала может принимать различные значения в зависимости от его пористости.

Например, для керамики средняя плотность может принимать значения от $\rho_e = 0,4$ г/см³ (керамзит) до $\rho_e = 2,7$ г/см³ (керамическая плитка для полов).

Насыпная плотность для конкретного вида материала может принимать различные значения в зависимости от межзерновой пустотности.

Например, для керамзитового гравия насыпная плотность может иметь любое значение от минимального $\rho_n = 0,2$ г/см³ до максимального $\rho_n = 0,8$ г/см³.

Плотности некоторых строительных материалов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Плотность некоторых строительных материалов

Наименование материала	Плотность, кг/м ³		
	средняя ρ_e	истинная $\rho_{и}$	насыпная ρ_n
Сталь	7850	7800–7900	–
Гранит	2500–2900	2700–3000	–
Известняк (плотный)	1600–2400	2400–2600	–
Песок кварцевый	–	2500–2600	1100–1300
Глина	–	2500–2700	1200–1400
Портландцемент	–	≈ 3000	1100–1300
Кирпич (керамический)	600–1900	2600–2700	–
Керамзит	400–600	2600–2700	200–600
Бетон (тяжелый)	2100–2500	2500–2600	–
Древесина (сосна)	400–600	1550–1600	–
Пенопласт (полистирольный)	10–20	2600–2760	–

ПОРИСТОСТЬ

Общий объем строительного материала в естественном состоянии складывается из *объема пор* $V_{п}$ и *объема твердого вещества* V_a в абсолютно плотном состоянии (без пор):

$$V_e = V_{п} + V_a, \quad (2.6)$$

где V_e – объем материала в естественном состоянии, см³;

$V_{п}$ – объем пор в материале, см³;

V_a – объем материала в абсолютно плотном состоянии, (без пор), г/см³.

В зависимости от *количества* пор и *вида* пористости (открытая, закрытая) значительно изменяются свойства материала.

Структуру строительного материала характеризуют следующие величины: *пористость* P ; *коэффициент плотности* $k_{пл}$; *коэффициент насыщения* порами k_n .

Пористость P – это *степень заполнения* порами объема материала. Она равна отношению суммарного объема пор V_{Π} к объему материала (в естественном состоянии) V_E и выражается в долях или в процентах:

$$P = V_{\Pi} / V_e \text{ или } P = (V_{\Pi} / V_e) 100 \% , \quad (2.7)$$

где P – общая пористость;

V_{Π} – объем пор в материале, см^3 ;

V_e – объем материала в естественном состоянии, см^3 .

Путем преобразований можно выразить пористость через величины плотности материала:

$$\begin{aligned} P &= V_{\Pi} / V_E = (V - V_A) / V_E = 1 - V_A / V_E = 1 - (V_A \cdot m) / (V_E \cdot m) = \\ &= (1 - \rho_c / \rho_u) 100 \% ; \\ P &= (1 - \rho_c / \rho_u) 100 \% . \end{aligned} \quad (2.8)$$

где P – общая пористость;

V_{Π} – объем пор в материале, см^3 ;

V_e – объем материала в естественном состоянии, см^3 ;

V_a – объем материала в абсолютно плотном состоянии (без пор), см^3 ;

m – масса материала, г;

ρ_e – средняя плотность материала, $\text{г}/\text{см}^3$;

ρ_u – истинная плотность материала, $\text{г}/\text{см}^3$.

Различают два вида пористости: *открытую* пористость $P_{\text{ОТКР}}$ и *закрытую* пористость $P_{\text{ЗАКР}}$.

Открытая пористость $P_{\text{ОТКР}}$ равна отношению суммарного объема всех пор, насыщающихся водой, к объему материала в естественном состоянии V_e :

$$P_{\text{ОТКР}} = [(m_2 - m_1) / \rho_{\text{ув}}] / V_e ,$$

где $P_{\text{ОТКР}}$ – открытая пористость в долях;

m_1 – масса образца в сухом состоянии, г;

m_2 – масса образца в насыщенном водой состоянии, г;

$\rho_{\text{иВ}}$ – истинная плотность воды, г/см³.

V_e – объем материала в естественном состоянии, см³.

Закрытая пористость $P_{\text{ЗАКР}}$ равна разности между общей пористостью P и открытой пористостью $P_{\text{ОТКР}}$:

$$P_{\text{ЗАКР}} = P - P_{\text{ОТКР}}, \quad (2.9)$$

где $P_{\text{ЗАКР}}$ – закрытая пористость;

P – общая пористость;

$P_{\text{ОТКР}}$ – открытая пористость.

Коэффициент плотности $k_{\text{ПЛ}}$ – это степень заполнения объема материала твердым веществом, который равен отношению *объема* твердого вещества в абсолютно плотном состоянии V_a к *объему* материала в естественном состоянии V_e :

$$k_{\text{ПЛ}} = V_a / V_e = (m / \rho_u) / (m_1 / \rho_e) = \rho_e / \rho_u; \quad (2.10)$$
$$k_{\text{ПЛ}} = \rho_e / \rho_u.$$

Коэффициент насыщения пораами k_n характеризует *соотношение* открытой и закрытой пористости и равен отношению открытой пористости материала к закрытой пористости:

$$k_n = P_{\text{ОТКР}} / P_{\text{ЗАКР}}, \quad (2.11)$$

где k_n – коэффициент насыщения пораами;

$P_{\text{ОТКР}}$ – открытая пористость материала;

$P_{\text{ЗАКР}}$ – закрытая пористость материала.

2.3 Гидрофизические свойства

К гидрофизическим свойствам материала относятся: *гигроскопичность*, или сорбционная влажность; *водопоглощение* по массе и по объему; *водопортебность*, *водостойкость*; *водопроницаемость*; *паропроницаемость*; *влажностные деформации*; *морозостойкость*.

ГИГРОСКОПИЧНОСТЬ

Гигроскопичность (*сорбционная* влажность) – свойство материала поглощать водяной пар из влажного воздуха.

Это свойство обусловлено *адсорбцией* водяного пара на внутренней поверхности пор и *капиллярной конденсацией*. Этот физико-химический процесс называется *сорбцией*. Он является обратимым и повышается с повышением давления водяного пара, т. е. с увеличением относительной влажности воздуха при постоянной температуре.

Гигроскопичность W_G характеризуется количеством адсорбционной влаги в единице массы материала:

$$W_G = [(m_2 - m_1) / m_1] 100 \%, \quad (2.12)$$

где W_G – гигроскопичность, проценты;

m_1 – масса образца в сухом состоянии, г;

m_2 – масса образца во влажном состоянии

(после стандартной выдержки над водой), г.

ВОДОПОГЛОЩЕНИЕ

Водопоглощение – свойство материала *поглощать и удерживать* в своем объеме воду. Это свойство обусловлено наличием в материале открытой пористости.

Различают два вида водопоглощения: *водопоглощение по массе* W_m и *водопоглощение по объему* W_V .

Водопоглощение по массе W_m характеризует содержание массы воды в единице массы материала:

$$W_m = (m_2 - m_1) / m_1, \quad (2.13)$$

где W_m – водопоглощение по массе в долях;

m_1 – масса образца в сухом состоянии, г;

m_2 – масса образца в насыщенном водой состоянии, г.

Водопоглощение по объему W_V характеризует содержание *объема воды* в единице объема материала в естественном состоянии:

$$\begin{aligned} W_V &= [(m_2 - m_1) / \rho_{uB}] / V_e; \\ W_V &= (m_2 - m_1) / (\rho_{uB} \cdot V_e), \end{aligned} \quad (2.14)$$

где W_V – водопоглощение по объему в долях;

m_1 – масса образца в сухом состоянии, г;

m_2 – масса образца в насыщенном водой состоянии (после выдержки в воде), г;

ρ_{uB} – истинная плотность воды, г/см³;

V_e – объем материала в естественном состоянии, см³.

Водопоглощение по объему в точности равно величине открытой пористости материала, так как только открытые поры заполняются водой:

$$W_V = P_{OTKP} = (m_2 - m_1) / (\rho_{uB} \cdot V_e). \quad (2.15)$$

Водопоглощение по объему W_V не может быть равным или более 100 % по определению.

Выражение, связывающее величины водопоглощения по объему W_V и водопоглощения по массе W_m с величинами средней ρ_e и относительной плотности d , получим, разделив W_V на W_m :

$$\begin{aligned} W_V / W_m &= [(m_2 - m_1) / (\rho_{uB} \cdot V_e)] / [(m_2 - m_1) / m_1] = \rho_e / \rho_{uB}; \\ W_V / W_m &= \rho_e / \rho_{uB} = d, \end{aligned}$$

где W_V – водопоглощение по объему в долях;

W_m – водопоглощение по массе в долях;

m_1 – масса образца в сухом состоянии, г;

m_2 – масса образца в насыщенном водой состоянии (после выдержки в воде), г;

ρ_e – средняя плотность материала, г/см³;

ρ_{uB} – плотность воды, г/см³, $\rho_{uB} = 1$ г/см³;
 d – относительная плотность материала, равная отношению средней плотности материала к плотности воды.

Водопоглощение по массе W_m некоторых строительных материалов: водопоглощение гранита – 0,02–0,7 %; водопоглощение тяжелого бетона – 2–4 %; водопоглощение теплоизоляционных материалов – более 100 %.

КОЭФФИЦИЕНТ НАСЫЩЕНИЯ

Коэффициент насыщения пор водой k_H – это отношение *открытой* пористости к *общей* пористости:

$$k_H = P_{откр}/P, \quad (2.16)$$

где k_H – коэффициент насыщения;
 $P_{откр}$ – открытая пористость материала, см³;
 P – общая пористость материала, см³.

Коэффициент насыщения характеризует количественно долю открытой пористости и может изменяться от 0 (вся пористость закрытая) до 1 (вся пористость открытая).

ВОДОСТОЙКОСТЬ

Водостойкость – способность материала сохранять прочность при увлажнении. Влагостойкость характеризуется коэффициентом размягчения. **Коэффициент размягчения** k_P равен отношению прочности влажного материала, насыщенного водой, R_{BM} , к прочности сухого материала R_{CM} :

$$k_P = R_{BM}/R_{CM}, \quad (2.17)$$

где k_P – коэффициент размягчения;
 R_{BM} – предел прочности материала, насыщенного водой, МПа;
 R_{CM} – предел прочности сухого материала, МПа.

Коэффициент размягчения характеризует *влажностойкость* материала, он изменяется от 0 (например, глиняный саман) до 1 (например, керамическая плитка для пола).

ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ

Водопроницаемость – свойство материала пропускать воду под давлением через слой материала от одной поверхности к другой. Водопроницаемость характеризуется *коэффициентом фильтрации* k_ϕ .

Физическую сущность коэффициента фильтрации можно продемонстрировать следующим образом. Представим процесс водопроницаемости как прохождение некоторого количества воды M_B в течение времени τ через стеновое ограждение, имеющее толщину δ и площадь F , при разнице давлений между наружной и внутренней поверхностями ($p_H - p_B$). Тогда количество прошедшей воды M_B будет прямо пропорционально площади F , разности давлений ($p_H - p_B$), времени τ и обратно пропорционально толщине стены δ :

$$\begin{aligned} M_B &= k_\phi [F (p_H - p_B) \tau] / \delta; \\ k_\phi &= M_B \delta / [F (p_H - p_B) \tau], \end{aligned} \quad (2.18)$$

где M_B – количество прошедшей воды от одной поверхности к другой, кг;

k_ϕ – коэффициент фильтрации;

F – площадь поверхности материала, м²;

δ – толщина материала, м;

$(p_H - p_B)$ – разность давлений между поверхностями материала, Па;

τ – продолжительность водопроницаемости, с.

Коэффициент пропорциональности в этом уравнении имеет название **коэффициента фильтрации** k_f . Он имеет постоянное значение для каждого конкретного вида материала и приводится в справочной литературе.

Водопроницаемость зависит от плотности и строения материала. С увеличением пористости, особенно открытой пористости водопроницаемость увеличивается.

Водонепроницаемость – процесс, обратный водопроницаемости, характеризуется *периодом времени*, по истечении которого появляются признаки просачивания воды под определенным *давлением* через образец испытываемого материала (например, кровельные материалы) или предельной величиной *давления воды* в МПа, при которой вода еще не проходит через образец (например, водонепроницаемый бетон).

ПАРОПРОНИЦАЕМОСТЬ

Паропроницаемость – это способность материала *пропускать* через свою толщу водяной пар или газы (воздух). Паропроницаемость характеризуется **коэффициентом паропроницаемости** k_d .

Физическую сущность коэффициента паропроницаемости k_d можно продемонстрировать следующим образом. Представим процесс паропроницаемости как прохождение некоторого количества пара M_d в течение времени τ через стеновое ограждение, имеющее толщину δ и площадь F , при разнице парциальных давлений пара между наружной и внутренней поверхностями. Тогда масса прошедшего пара M_d будет прямо пропорциональна площади F , разности давлений $(p_H - p_B)$, времени τ и обратно пропорционально толщине стены δ . Коэффициент пропорциональности в этом уравнении имеет название **коэффициента паропроницаемости** и обозначается k_d . Он имеет постоянное значение для каждого конкретного вида материала и приводится в справочной литературе:

$$\begin{aligned} M_{\Pi} &= K_{\Pi} [F (p_H - p_B) \tau] / \delta; \\ k_{\Pi} &= M_{\Pi} \cdot \delta / [F(p_H - p_B) \tau], \end{aligned} \quad (2.19)$$

где M_{Π} – масса пара, прошедшего от одной поверхности к другой, кг;

k_{Π} – коэффициент паропроницаемости;

F – площадь поверхности материала, м²;

δ – толщина материала, м;

$(p_H - p_B)$ – разность давлений между поверхностями, Па;

τ – продолжительность паропроницаемости, с.

Паропроницаемость зависит от плотности и строения материала. С увеличением открытой пористости паропроницаемость увеличивается.

Паропроницаемость играет значительную роль в обеспечении требуемых эксплуатационных условий. С одной стороны, стеновые материалы для жилищного строительства должны обладать нормативной *паропроницаемостью*, т. е. через наружные стены должна будет происходить естественная вентиляция. С другой стороны, для ряда помещений специального назначения необходима полная *герметизация* с точки зрения газопроницаемости (например, газозащиты).

ВЛАЖНОСТНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

Влажностные деформации – это изменение *геометрических размеров* и объема материала при изменении его влажности. Влажностные деформации включают в себя *набухание* и *усадку*.

Набухание – увеличение размеров материала и объема при увлажнении. Механизм набухания заключается в том, что молекулы воды проникают между частицами материала и как бы расклинивают их.

Усадка (усушка) – уменьшение размеров и объема материала при его высыхании. Механизм усадки заключается в том, что уменьшается толщина слоев воды, окружающей частицы

материала. Величины усадки некоторых материалов: древесина поперек волокон – 30–100 мм/м; кирпич керамический – 0,03–0,1 мм/м; тяжелый бетон – 0,3–0,7 мм/м; гранит – 0,02–0,06 мм/м.

МОРОЗОСТОЙКОСТЬ

Морозостойкость – свойство материала, *насыщенного водой*, выдерживать попеременное замораживание и оттаивание без значительного разрушения и снижения прочности.

Морозостойкость оценивается *маркой по морозостойкости* F , которая характеризуется количеством *циклов*. Критерии морозостойкости приведены в стандартах на данный вид материала. Например, для керамического кирпича с маркой по морозостойкости $F100$ критерием морозостойкости после 100 циклов стандартного замораживания и оттаивания является

потеря не более 15 % прочности и не более 5 % массы. Механизм разрушения увлажненного материала при знакопеременных температурах связан с появлением в нем *напряжений*, вызванных увеличением объема (примерно на 9 %) при переходе воды в лед.

Морозостойкость *плотных* (без пор) *материалов*, как правило, характеризуется высокой маркой по морозостойкости.

Морозостойкость *пористых материалов* определяется величиной и характером пористости (открытая или закрытая), а также условиями эксплуатации изготовленных из них конструкций.

Морозостойкость пористого материала увеличивается:

- при увеличении средней *плотности* материала и его *прочности* при растяжении;
- при *уменьшении* открытой пористости материала;
- при таком *размере пор и характере пористости*, которые обеспечивают свободное пространство для *компенсации* увеличения объема образовавшегося из воды льда.

ВОДОПОТРЕБНОСТЬ

Водопотребность характеризуется количеством воды для *смачивания* поверхности материала. *Водопотребность* для одного и того же материала определяется величиной площади *поверхности смачивания*, приходящейся на единицу массы материала. При одном и том же объеме, *округлая форма* гранитного гравия всегда обеспечивает меньшую водопотребность, чем *угловатая форма* гранитного щебня за счет более развитой удельной поверхности последнего. Для стандартного портландцемента удельная поверхность материала должна быть не менее $3000 \text{ см}^2/\text{г}$, что обеспечивает нормальную (стандартную) водопотребность.

2.4 Теплофизические свойства

Теплофизические свойства характеризуют отношение материала к тепловому воздействию и характеризуются следующими показателями: *теплопроводностью*, *теплоемкостью*, *термостойкостью*, *огнестойкостью*, *огнеупорностью*.

В общем случае **процесс теплопередачи** включает в себя следующие составляющие: **теплопроводность** (необходимо наличие материальной среды – твердой, жидкой или газообразной); **конвекцию** (необходимо наличие газообразной или жидкой среды); **излучение** (необходимо наличие прозрачной жидкой, газообразной или вакуумной среды).

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Теплопроводность – это свойство материала передавать тепло от одной поверхности к другой.

В процессе теплопередачи тепловой поток проходит через твердый каркас и воздушные ячейки пористого материала. Теплопроводность воздуха значительно меньше, чем у любого твердого вещества, из которого состоит поровый каркас строи-

тельного материала, поэтому увеличение пористости материала является основным способом уменьшения теплопроводности. В материале стремятся создать мелкие равномерно распределенные поры, чтобы снизить количество тепла, передаваемое конвекцией.

Теплопроводность материала характеризуется **коэффициентом теплопроводности** λ . Он имеет постоянное значение для каждого конкретного вида материала и приводится в справочной литературе:

Физическую сущность коэффициента теплопроводности можно продемонстрировать следующим образом. Представим процесс теплопроводности как прохождение некоторого количества тепла Q в единицу времени τ через стеновое ограждение, имеющее толщину δ и площадь F и разницу температур между наружной и внутренней поверхностями $(t_H - t_B)$. Тогда количество прошедшего тепла Q будет прямо пропорционально площади F , разности температур $(t_H - t_B)$, времени τ и обратно пропорционально толщине стенки δ .

Коэффициент пропорциональности в этом уравнении – это и есть коэффициент теплопроводности λ .

$$Q = \lambda \frac{(t_H - t_B)F \cdot \tau}{\delta}; \quad \lambda = \frac{Q \cdot \delta}{(t_H - t_B)F \cdot \tau} \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{К)}, \quad (2.20)$$

где Q – количество переданного тепла от одной поверхности к другой, Дж;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м $\cdot$ °К);

F – площадь поверхности материала, м²;

δ – толщина материала, м;

$(t_H - t_B)$ – разность температур между поверхностями материала, °К;

τ – продолжительность процесса теплопередачи, с.

Теплопроводность зависит от плотности и строения материала. Для одного и того же вида материала теплопроводность увеличивается: с увеличением средней плотности материала и уменьшение его пористости; при увеличении влажности материала; при повышении температуры материала.

Термическое сопротивление слоя ограждающей конструкции:

$$R = \delta / \lambda, \quad (2.21)$$

где R – термическое сопротивление слоя;

δ – толщина слоя, м;

λ – теплопроводность, Вт/(м·°К).

Термическое сопротивление связывает толщину и теплопроводность слоя материала и является тепловой характеристикой качества ограждающей конструкции.

Чем меньше коэффициент теплопроводности материала, тем больше термическое сопротивление при одной и той же толщине слоя.

ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Теплоемкость – свойство материала *аккумулировать* тепловую энергию при нагревании. Теплоемкость оценивают **коэффициентом теплоемкости** c – количеством теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг данного материала, чтобы повысить его температуру на 1 °С.

Примеры коэффициентов теплоемкости различных материалов приведены ниже: древесина – 2,39–2,72 кДж/(кг·°С); природные и искусственные каменные материалы – 0,75–0,92 кДж/(кг·°С); сталь 0,487 кДж/(кг·°С). Вода имеет очень большую теплоемкость $c = 4,19$ кДж/(кг·°С), поэтому для обогрева помещений из влажных строительных материалов необходимо тратить значительно больше тепловой энергии, чем для сухих помещений.

Термостойкость – способность материала выдерживать чередование (циклы) резких тепловых изменений (перепадов). Измеряется количеством циклов. Это свойство зависит от однородности материала и *коэффициента теплового линейного температурного расширения* составляющих его веществ.

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОВОГО ЛИНЕЙНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСШИРЕНИЯ

Коэффициент теплового линейного температурного расширения $k_{ТЛТР}$ равен относительному удлинению 1 м материала при увеличении его температуры на 1 °С. Ниже приведены коэффициенты теплового линейного температурного расширения некоторых строительных материалов: бетон и сталь – $10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; гранит – $(8\text{--}10) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; древесина – $20 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Этот коэффициент играет большую роль при выборе составляющих материалов при проектировании композиционных материалов. Например, армирование бетона стальной арматурой не приводит к возникновению внутренних напряжений при температурных колебаниях, вследствие равенства коэффициентов теплового расширения (см. приведенные выше данные). Важность учета теплового расширения можно показать на примере изменения длины большепролетных железобетонной конструкций длиной 100 м и выше (пролет моста) при изменении температуры от 20 °С в летний период и до (–40) °С в зимний период:

$$\Delta l = l \cdot k_{ТЛТР} \cdot \Delta T = 100 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 60 = 100 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 60 = 0,06 \text{ м},$$

где Δl – изменение длины конструкции, м;

l – длина конструкции при 20 °С, $l = 100$ м;

$k_{ТЛТР}$ – коэффициент линейного температурного расширения, $k_{ТЛТР} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

ΔT – интервал температурного перепада, $\Delta T = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Для исключения деформаций и разрушения, конструкции большой протяженности разделяют деформационными швами и устраивают шарнирное соединение на одной из опор большепролетного сооружения.

Огнестойкость – свойство материала сопротивляться *огнево*му воздействию при пожаре в течение определенного времени без потери несущей способности. Измеряется в единицах времени.

Горючесть – свойство материала *воспламеняться* и поддерживать *горение*.

По горючести материалы делятся на следующие классы:

несгораемые – не подвержены воспламенению, тлению и обугливанию; *трудносгораемые* – тлеют и обугливаются только в присутствии огня; *сгораемые* – воспламеняются, горят открытым пламенем после удаления огня.

Огнеупорность – свойство материала выдерживать длительное воздействие *высокой температуры*, не размягчаясь и не деформируясь.

По огнеупорности материалы подразделяются на виды:

огнеупорные – выдерживают температуру более 1580 °С;

тугоплавкие – выдерживают температуру более от 1350 до 1580 °С;

легкоплавкие – выдерживают температуру менее 1350 °С;

жаростойкие – выдерживают температуру до 1000 °С.

2.5 Механические свойства

Механические свойства отражают способность материала сопротивляться силовым, тепловым, усадочным или другим внутренним напряжениям без нарушения структуры.

Механические свойства включают в себя *прочность*, *деформативность*, *релаксацию*, *ударную вязкость*, *твердость*, *истираемость*.

ПРОЧНОСТЬ

Прочность – свойство материала сопротивляться разрушению от *внутренних напряжений*, вызванных внешними воздействиями среды эксплуатации.

Для хрупких материалов (каменные материалы, бетоны, строительные растворы) прочность материала оценивают **пределом прочности** R , определенным при данном виде деформации: $R_{СЖ}$ – предел прочности при сжатии; $R_{И}$ – предел прочности при изгибе, R_P – предел прочности при нормальном разрыве. Поскольку строительные материалы неоднородны, то предел прочности определяют как средний результат стандартных испытания серии образцов (не менее трех). На результаты испытаний оказывают влияние следующие факторы: *размеры* образцов, *форма* образцов, *скорость* нагружения образца, *состояние* опорных поверхностей образцов.

Влияние **размеров образцов** на результат испытаний заключается в том, что для одного и того же материала у кубов малых размеров предел прочности при сжатии оказывается *выше*, чем у кубов больших размеров. Это объясняется тем, что при сжатии образца возникает его поперечное расширение. *Силы трения*, возникающие между опорными гранями образца и плитами пресса, удерживают части образца, прилегающие к плитам, от поперечного расширения. Средние же слои разрушаются в первую очередь. Получается характерная форма разрушения: две усеченные пирамиды, соприкасающиеся вершинами (рисунок 2.1, а).

Если смазать опорные грани куба, то при разрушении получается иная картина – куб распадается на ряд слоев, разделенных вертикальными трещинами (рисунок 2.1, б). Прочность образцов со смазанными поверхностями будет составлять только 50 % от прочности образца с несмазанными поверхностями.

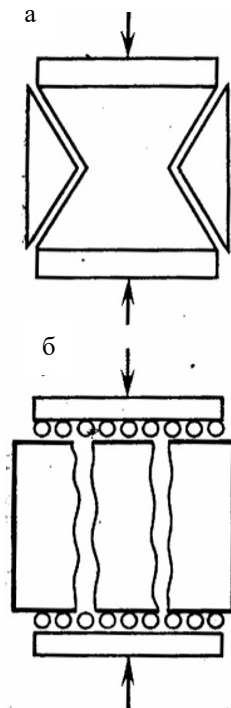


Рисунок 2.1 – Формы разрушения образцов хрупкого материала:
а – предел сжатия бетонного куба на испытательном прессе;
б – предел сжатия бетонного куба со смазанными опорными гранями

Влияние *формы образцов* на результат испытаний заключается в том, что призмы показывают меньшее сопротивление сжатию, чем кубы того же поперечного сечения. Это объясняется тем, что при сжатии силы трения, возникающие между опорными гранями образца и плитами пресса, удерживают части образца, прилегающие к плитам, от поперечного расширения. Причем с увеличением расстояния между опорами влияние силы трения ослабевает, поэтому для призмы прочность будет составлять только 75 % от прочности кубического образца (при одинаковой площади поперечного сечения).

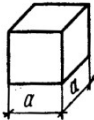
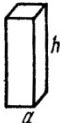
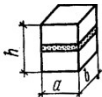
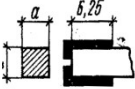
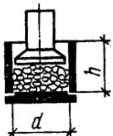
Влияние *скорости нагружения* на результаты испытания образцов заключается в следующем. Если нагрузка возрастает быстрее, то результат получается завышенным, так как в образце не успевают развиваться пластические деформации. И наоборот, если нагрузка растет медленно, то результаты получаются заниженными, так как пластические деформации опережают рост нагрузки.

Для получения достоверных результатов необходимо устранить влияние состояния *опорных поверхностей* так, чтобы поверхность материала, примыкающая к плитам пресса, была ровной, без каверн и выбоин. В противном случае поверхность предварительно подготавливают к испытаниям путем искусственного создания ровной плоскости.

Чтобы устранить влияние вышеперечисленных условных факторов, прочность материала определяют по единым *стандартным методикам*, где оговариваются размеры и форма образцов, а также скорость нагружения (таблица 2.1).

Важнейшим показателем качества конструкционного материала является его прочность, которую характеризует *марка прочности* материала, которую определяют стандартными методами как средний результат испытания серии образцов.

Таблица 2.1 – Схема стандартных методов

Образец	Эскиз	Расчетная формула	Материал	Размер стандартного образца, см
Куб		$R = \frac{P}{a^2}$	Бетон	15×15×15
			Раствор	7,07×7,07×7,07
			Природный камень	5×5×5
				10×10×10 15×15×15 20×20×20
Цилиндр		$R = \frac{4P}{\pi d^2}$	Бетон	$d = 15; h = 30$
			Природный камень	$d = h = 5; 7; 10; 15$
Призма		$R_{ПП} = \frac{P}{a^2}$	Бетон	$a = 10; 15; 20$ $h = 40; 60; 80$
			Древесина	$a = 2;$ $h = 3$
Составной образец		$R = \frac{P}{S}$	Кирпич	$a = 12;$ $b = 12,3;$ $h = 14$
Половина образца-призмы из цементно-песчаного раствора		$R = \frac{P}{S}$	Цемент	$a = 4;$ $S = 25\text{см}^2$
Проба щебня (гравия) в цилиндре		$D_p = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100$	Крупный заполнитель для бетона	$d = 15$ $h = 15$

В нормативных документах марка конструкционного материала обозначается буквой, рядом с которой указывается его значение в единицах прочности (кгс/см², или МПа), причем сама размерность единиц не указывается: например, *ПЦ М500* – портландцемент, прочность стандартных образцов которого составляет не менее 500 кгс/см², *Г10* – гипс строительный, прочность стандартных образцов которого составляет не менее 10 МПа.

Класс прочности характеризует показатель прочности материала с определенной статистической обеспеченностью. При этом используется **коэффициент вариации** прочности, который приводится в стандарте и характеризует разброс значений прочности, связанный с неоднородностью материала (таблица 2.2).

В нормативных документах **класс бетона** обозначается латинской буквой *B*, рядом с которой указывается его значение в МПа, причем сама размерность единиц не указывается: например, *B35* – бетон класса 35, прочность стандартных образцов которого с учетом коэффициента вариации составляет не менее 35 МПа в любом месте строительной конструкции.

Предел прочности при **осевом сжатии**:

$$R_{СЖ} = \frac{P_{РАЗР}}{F}, \quad (2.22)$$

где $R_{СЖ}$ – предел прочности при осевом сжатии, МПа;

$P_{РАЗР}$ – разрушающая сила, Н;

F – поперечное сечение образца, м².

Предел прочности при **осевом растяжении**

$$R_{РАСТ} = \frac{P_{РАЗР}}{F}, \quad (2.23)$$

где $R_{РАСТ}$ – предел прочности при осевом растяжении, Па;

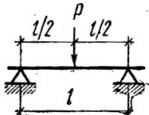
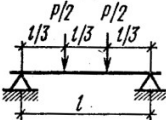
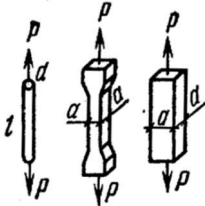
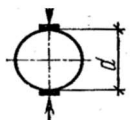
$P_{РАЗР}$ – разрушающая сила, Н;

F – поперечное сечение образца, м².

Прочность на сжатие и прочность на растяжение являются важными характеристиками конструкционных материалов.

В зависимости от строения материала изменяется соотношение между этими величинами для одного того же материала: $R_{РАСТ} > R_{СЖ}$ – волокнистые материалы (дерево); $R_{РАСТ} \cong R_{СЖ}$ – металлы (сталь); $R_{РАСТ} < R_{СЖ}$ – хрупкие материалы (природные камни, бетон, кирпич).

Таблица 2.2 – Схема стандартных методов определения прочности

Образец	Эскиз	Расчетная формула	Материал	Размер образца, см
Испытание на изгиб				
Призма, кирпич в натуре		$R = \frac{3Pl}{2bh^2}$	Цемент	4×4×16
			Кирпич	12×6,5×25
Призма		$R_{Р.И.} = \frac{Pl}{bh^2}$	Бетон	15×15×60
			Древесина	2×2×30
Испытание на растяжение				
Стержень, ось-мерка, призма		$R_H = \frac{4P}{\pi d^2}$	Бетон	5×5×50 10×10×80
		$R_P = \frac{P}{a^2}$	Сталь	$d_0 = 1; l_0 = 5;$ $l \geq 10$
Цилиндр		$R_P = \frac{2P}{\pi dl}$	Бетон	$d = 15$

Предел прочности *при изгибе* – прочность образцов материала в виде стандартных балочек, установленных на двух опорах:

$$R_H = 3P \cdot \ell / (2b \cdot h^2), \quad (2.24)$$

где P_H – нагрузка, Н;

ℓ – расстояние между опорами, м;

b – ширина образца, м;

h – высота образца, м.

Теоретическая прочность при растяжении характеризуется напряжением, необходимым для *разделения* двух примыкающих друг к другу слоев атомов. Теоретическая прочность стали 30000 МПа, обыкновенной стали – около 400 МПа. Теоретическая прочность стекла – 14000 МПа, обыкновенного – 70–150 МПа. На прочность оказывает влияние макроструктура материала (плотность, пористость, пустотность), микроструктура (дислокации кристаллов – линейный дефект кристаллической решетки), химический и минералогический состав материала.

ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА

Деформативные свойства материала включают в себя такие характеристики, как *релаксация*, *упругость*, пластичность, *хрупкость*.

Релаксация – свойство материала *самопроизвольно снижать* напряжения при условии, что начальная величина деформации остается *неизменной*. При релаксации напряжений может измениться характер начальной деформации, например, из упругой постепенно перейти в пластическую, при этом изменения размеров материала не происходит. Это возможно за счет межмолекулярных перемещений и переориентации внутримолекулярной структуры.

Время, в течение которого первоначальная величина напряжения снижается в $e = 2,718$ раз (e – основание натурального логарифма), называют **периодом релаксации**. Период релаксации для материалов: жидкой консистенции – 10^{-10} с; твердых материалов – $2 \cdot 10^{10}$ с (более десяти лет).

Упругость – свойство материала *самопроизвольно восстанавливать* первоначальную форму и размеры после *прекращения* действия внешней силы. Упругая деформация *обратима*.

Пластичность – свойство материала изменять форму или размеры под действием внешних сил, не разрушаясь, и сохранять эту *форму* после снятия нагрузки. Пластическая деформация *необратима*.

Хрупкость – свойство материала разрушаться под действием нагрузки *без* заметной пластической деформации. Для хрупких материалов характерна большая разница в пределах прочности при сжатии и растяжении (в 10–15 раз и более). Характер разрушения строительных материалов зависит от температуры, влажности и скорости нагружения. Например, битум при отрицательных температурах разрушается как хрупкий материал, а при положительных – как пластичный.

Относительная деформация – равна отношению абсолютной *деформации* к *первоначальному* линейному размеру образца (рисунок 2.2):

$$\varepsilon = \Delta \ell / \ell, \quad (2.25)$$

где ε – относительная деформация;

$\Delta \ell$ – абсолютная деформация, м;

ℓ – первоначальный линейный размер образца, м.

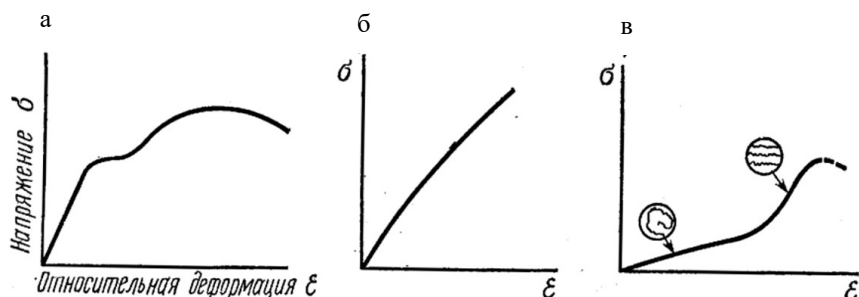


Рисунок 2.2 – Схемы диаграмм деформаций:
а – сталь; б – бетон; в – эластомер

Модуль упругости E (модуль Юнга) связывает упругую деформацию и одноосное напряжение линейным соотношением, выражающим **закон Гука**:

$$\varepsilon = \sigma / E, \quad (2.26)$$

где ε – относительная деформация;
 σ – одноосное напряжение, Па, $\sigma = P/F$;
 P – действующая сила, Н;
 F – площадь первоначального поперечного сечения, м²;
 E – модуль Юнга, Па.

Модуль упругости E представляет собой меру жесткости материала.

УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ

Ударная вязкость (динамическая прочность) – свойство материала сопротивляться при ударных нагрузках. Ударная вязкость характеризуется количеством работы, затраченной на разрушение стандартного образца, отнесенной к единице объема (Дж/м³) или площади (Дж/м²). Отношение динамической прочности к статической называют **динамическим коэффициентом**.

Коэффициент конструктивного качества (к.к.к.) – равен отношению предела прочности при сжатии R к относительной плотности материала d :

$$\text{к.к.к.} = R/d, \quad (2.27)$$

где к.к.к. – коэффициент конструктивного качества, Па;

R – предел прочности при сжатии, Па;

d – относительная плотность материала, $d = \rho_e / \rho_B$;

ρ_e – средняя плотность материала, г/см³;

ρ_B – плотность воды, г/см³.

Коэффициент конструктивного качества служит для оценки прочностной эффективности конструкционных теплоизоляционных материалов.

Наиболее эффективными являются материалы, имеющие малую плотность при высокой прочности.

ТВЕРДОСТЬ

Твердость – свойство материала сопротивляться проникновению в него другого более *твердого* тела.

Твердость природных каменных материалов оценивается **шкалой Мооса**, которая представлена десятью минералами с условным показателем твердости от 1 до 10 (самый мягкий тальк – показатель 1, самый твердый алмаз – показатель 10):

1 – **тальк** – легко царапается ногтем;

2 – **гипс** – царапается ногтем;

3 – **кальцит** – легко царапается стальным ножом;

4 – **флюорит** – царапается стальным ножом под
небольшим нажимом;

5 – **апатит** – царапается ножом под сильным нажимом;

6 – **ортоклаз** – царапает стекло;

7 – **кварц** – легко царапает стекло;

8 – *топаз*;

9 – *корунд*;

10 – *алмаз*.

Показатель твердости испытуемого материала находится между показателями твердости двух соседних минералов, из которых один царапает испытываемый материал, а другой оставляет черту на образце материала.

Твердость металла, бетона, пластмасс определяют, вдавливая в испытуемый материал (при стандартной нагрузке и в течение нормативного времени) *стальной шарик*. За характеристику твердости принимают **число твердости HB** , равное отношению *нагрузки* к площади *отпечатка*:

$$HB = P/F, \quad (2.28)$$

где HB – число твердости, Па;

P – нагрузка, Н;

F – площадь поверхности отпечатка, м^2 .

Истираемость оценивают *потерей* первоначальной массы образца материала, отнесенной к площади *поверхности* истирания F :

$$I = \frac{m_1 - m_2}{F}, \quad (2.29)$$

где I – истираемость материала, $\text{г}/\text{м}^2$;

m_1 – масса образца до истирания, г;

m_2 – масса образца после истирания, г;

F – площадь истирания, м^2 .

Износ – свойство материала сопротивляться *одновременному* воздействию истирания и ударов. Оценивается потерей массы в процентах:

$$\text{ИЗН} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100\%, \quad (2.30)$$

где *ИЗН* – износ материала, проценты;

m_1 – масса образца первоначальная, г;

m_2 – масса образца после износа, г.

Долговечность – свойство изделия *сохранять* работоспособность до предельного состояния с необходимыми *перерывами* на ремонт. Измеряют сроком службы без потери эксплуатационных качеств в конкретных климатических условиях и режиме эксплуатации: *1 степень* – 100 лет; *2 степень* – 50 лет; *3 степень* – 20 лет.

Надежность складывается из *долговечности, безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости*.

2.6 Физико-химические и технологические свойства

Физико-химические свойства характеризуют способность материала вступать в химическое взаимодействие с веществами внешней среды, в которой он находится, или сохранять свой состав и структуру в условиях инертной окружающей среды.

Химические и физико-химические свойства включают в себя такие понятия как *дисперсность, адгезия, когезия, структурная прочность, вязкость, тиксотропия, химическая стойкость*.

Дисперсность – характеристика *размеров* составляющих частей материала после его измельчения (твердых частиц или капель жидкости).

Дисперсность характеризуется *удельной поверхностью* материала – величиной, характеризующей степень раздробленности материала и развитости его поверхности.

Удельная поверхность материала выражается через поверхность материала, отнесенную к его массе или к объему:

$$S_{уд} = S/m; \quad S_{уд} = S/V, \quad (2.31)$$

где $S_{уд}$ – удельная поверхность, см^2 ;
 m – масса материала, г;
 V – объем материала, см^3 .

Скорость химической реакции прямо пропорциональна *площади поверхности* взаимодействующих веществ, поэтому все минеральные вяжущие находятся в тонкодисперсном состоянии, что обеспечивает их химическую активность за счет развита реакционной поверхности.

Например, 1 см^3 цементного клинкера имеет поверхность 6 см^2 , а полученный из него в результате тонкого помола обычный портландцемент имеет суммарную поверхность $9000\text{--}10500 \text{ см}^2$ ($S_{уд} = 3000\text{--}3500 \text{ см}^2/\text{г}$); быстротвердеющий портландцемент – $13500\text{--}15000 \text{ см}^2$ ($S_{уд} = 4500\text{--}5000 \text{ см}^2/\text{г}$).

Адгезия – свойство одного материала *прилипать* к поверхности другого, что обеспечивается молекулярной связью между поверхностными слоями двух соприкасающихся разнородных твердых или жидких тел. Адгезия двух различных материалов зависит от природы материала, формы и состояния поверхности, условий контакта и т. д.

Например, цементное тесто обладает хорошей адгезией к керамическому кирпичу и стальной арматуре.

Когезия – взаимное *притяжение* между молекулами в объеме данного материала, что обеспечивается прочностью молекулярной связи между его частями.

Например, при разрушении сцепления элементов кирпичной кладки возможны два варианта. Адгезионный разрыв – разрушение по плоскости примыкания цементно-песчаного раствора к кирпичу. Когезионный разрыв – разрушение в слое цементно-песчаного раствора.

Структурная прочность – прочность *внутренних связей* между частицами материала. Структурная прочность характеризуется предельным напряжением сдвига, соответствующим такому напряжению в материале, при котором он начинает течь подобно жидкости:

$$\sigma_T = P/F, \quad (2.32)$$

где σ_T – предел текучести, Па;

P – нагрузка, Н;

F – площадь образца материала, м².

Это происходит тогда, когда в материале нарушаются внутренние связи между его частицами, то есть, когда разрушается структура материала.

Вязкость – способность материала *поглощать механическую энергию* при деформировании образца материала. Когда пластично-вязкий материал начинает течь, напряжение в материале зависит уже от *скорости* его деформации.

Коэффициент пропорциональности, связывающий скорость деформации и необходимое для этого напряжение, называют **вязкостью** η .

Тиксотропия – способность пластично-вязких смесей *разжижаться* при воздействии вибрации и обратимо восстанавливать свою структуру после прекращения воздействия.

Физическая основа *тиксотропии* – разрушение структурных связей внутри пластично-вязкого материала, при этом материал теряет структурную прочность и превращается в вязкую жидкость, а после прекращения механических воздействий материал вновь обретает структурную прочность. Явление тиксотропии используется при виброуплотнении бетонных и растворных смесей с целью повышения удобоукладываемости.

Химическая стойкость – свойство материала сопротивляться воздействию *агрессивных факторов* среды эксплуатации. Агрессивная среда (кислоты, щелочи, растворы солей, газы), взаимодействуя с материалом, может вызвать его разрушение – **коррозию**. Степень разрушения зависит от многих факторов, прежде всего от состава материала и его плотности.

Технологические свойства характеризуют способность материала к восприятию некоторых технологических операций, изменяющих состояние материала, структуру его поверхности, придающих нужную форму и размеры.

К числу технологических свойств, имеющих важное практическое значение в строительстве, можно отнести:

- дробимость материалов;
- распиливаемость материалов;
- шлифуемость материалов;
- гвоздимостью материалов;
- удобоукладываемость строительных смесей;
- укрывистость красочных составов.

2.7 Особые свойства строительных материалов

Радиационная стойкость – свойство материала сохранять свою структуру и физико-механические характеристики после воздействия *ионизирующих* излучений. Под воздействием современных источников ионизирующих излучений может происходить изменение структуры материала, которое может сопровождаться изменением объема и возникновением внутренних напряжений.

Коррозионная стойкость – способность строительного материала сохранять свои эксплуатационные свойства при воздействии *агрессивных факторов* среды эксплуатации. Например, для портландцементного камня в строительных конструкциях известны следующие виды коррозии – коррозия выщелачивания, кислотная коррозия, сульфатная коррозия и щелочная коррозия.

Контрольные вопросы

1. Строение и состав строительных материалов?
2. Истинная, средняя и насыпная плотности?
3. Пористость и пустотность строительных материалов?

4. Влажность, водопоглощение, водонепроницаемость строительных материалов?

4. Газо- и паропроницаемость. Капиллярная конденсация?

5. Морозостойкость строительных материалов. Критерии морозостойкости. Марка морозостойкости. Влияние структуры материала на морозостойкость?

6. Виды теплопередачи: теплопроводность, конвекция, излучение?

7. Огнеупорность и огнестойкость различных строительных материалов. Влияние состава материала на огнеупорность и огнестойкость?

8. Прочность строительных материалов. Расчетные формулы определения прочности на сжатие, разрыв и изгиб?

9. Твердость и истираемость строительных материалов?

10. Физико-химические и технологические свойства?

11. Особые свойства строительных материалов?

12. Коррозионная стойкость?

13. Радиационная стойкость?

14. Химическая стойкость?

3 ПРИРОДНЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Природные каменные материалы – это строительные материалы, полученные из *горных пород* и составляющих их *минералов*. **Горные породы** – это природные образования определенного состава и строения, образующие в земной коре самостоятельные *геологические тела*. Свойства горных пород определяются качественным и количественным *минеральным составом*. **Минералы** – однородные по химическому составу и физическим свойствам *составные части* горной породы.

КЛАССИФИКАЦИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

В зависимости от происхождения горные породы подразделяются на три группы: *магматические, осадочные и метаморфические* (таблица 3.1).

Магматические породы (первичные) – образуются в результате охлаждения и затвердевания *магмы*. В зависимости от условий формирования структуры магматические породы подразделяются на *излившиеся* и *глубинного заложения*.

Породы излившиеся (эффузивные), например, вулканическая пемза, туф, образуются при излиянии магмы из глубин и остывании на поверхности. В результате сравнительно быстрого охлаждения, при резком сбросе давления, происходит расширения газообразной фазы и формирование пористой структуры. Структура излившихся пород – скрытокристаллическая, стекловатая, порфировая (мелкокристаллическая масса, в которую включены крупные кристаллические соединения). Основные свойства – сравнительно небольшая прочность, низкая плотность, высокая пористость.

Породы глубинного заложения (интрузивные), например, гранит, базальт, диабаз, образуются при остывании магмы на разной глубине в земной коре. В результате медленного остывания (в течение миллионов лет) под давлением и воздей-

ствии силы тяжести происходит уплотнение структуры, перекристаллизация минералов и минерализация растворов. Структура таких пород – зернисто-кристаллическая, основные свойства – большая прочность, высокая плотность и практически отсутствие пористости.

Осадочные породы (вторичные) – образуются в поверхностных слоях земной коры из продуктов выветривания и разрушения горных пород и минералов. В зависимости от условий образования различают *обломочные породы*, *химические осадки* и *органогенные отложения*.

Обломочные породы, рыхлые и сцементированные, образовались в результате разрушения других пород под воздействием процесса *выветривания* (процесс совместного действия температуры, влажности и механических воздействий). К *рыхлым породам* относятся глина, песок, гравий, природный щебень. К *сцементированным породам*, подвергнутым цементированию природными цементами из минерализованных растворов, относятся песчаники, конгломераты, брекчии. Структура и свойства обломочных вторичных пород определяются аналогичными характеристиками исходных составляющих пород.

Химические осадки (например, глинозем, гипс, магнезит, доломит) образовались в результате выпадения в осадок веществ, перешедших в состав водных растворов в процессе разрушения горных пород. Химические осадки характеризуются определенным *химическим составом* и физическим свойствами составляющих минералов.

Органогенные отложения (например, мел, известняк, диатомит, трепел) образовались в результате *отложения* отмирающего растительного мира и мелких животных организмов водных бассейнов. Химический состав представлен в основном карбонатом кальция и физическими свойствами этого минерала – невысокая прочность, малая твердость, низкая химическая стойкость.

Метаморфические породы (видоизмененные) образуются в природе в результате *изменения* состава и строения *магматических* и *осадочных* пород, когда исходные породы в результате *тектонических процессов* перемещаются с поверхности в толщу земной коры. При длительном воздействии (в течение миллионов лет) сдвиговых деформаций (без расплавления первичных пород) и воздействия силы тяжести происходит уплотнение и перекристаллизация структуры.

Таблица 3.1 – Генетическая классификация горных пород

Магматические породы	Массивные	Глубинные	Граниты, сиениты, диориты, габбро
		Излившиеся	Порфиры, диабазы, трахиты, базальты, порфириты
	Обломочные	Рыхлые	Вулканические пеплы, пемзы.
		Сцементированные	Вулканические туфы
Осадочные породы	Механические отложения (обломочные породы)	Рыхлые	Глины, пески, гравий, щебень
		Сцементированные	Песчаники, конгломераты, брекчии
	Химические осадки		Гипс, ангидрит, магнезит, доломиты, известковые туфы, некоторые виды известняков
	Органогенные отложения		Известняки, мел, ракушечник, диатомиты, трепелы
Метаморфические породы	Продукты видоизменения изверженных пород		Гнейсы
	Продукты видоизменения осадочных пород		Мраморы, кварциты, глинистые сланцы

В результате метаморфических видоизменений из глин образуются глинистые сланцы, из известняков – мраморы, из графитов – алмазы и т. д.

Природные каменные материалы и изделия получают путем механической обработки горных пород (дробления, раскалывания, распиловки, шлифовки).

Строительные свойства горных пород и каменных изделий из них в значительной степени определяются химическим составом и физическими и механическими свойствами породообразующих материалов.

ЗАЩИТА КАМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ РАЗРУШЕНИЯ

Основные причины *разрушения* каменных материалов:

- 1) замерзание воды в порах и трещинах;
- 2) изменение температуры и влажности материала, вызывающее появление микротрещин за счет развития деформаций;
- 3) растворяющее действие воды и понижение прочности материала при его водонасыщении;
- 4) химическая коррозия под действием атмосферных газов (кислород O_2 , углекислый газ CO_2), грунтовых или морских вод;
- 5) разрушающая биологическая деятельность микроорганизмов.

При определении условий обеспечения долговечности каменных материалов принимаются во внимание следующие факторы:

- среда эксплуатации и агрессивные факторы среды эксплуатации;
- химико-минералогический состав каменного материала;
- макроструктура каменного материала.

Цель мероприятий по защите:

- уменьшение водопоглощения каменных материалов;

– снижение смачиваемости водой открытых поверхностей каменных материалов;

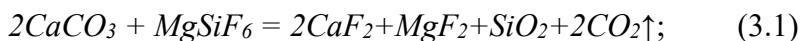
– исключение неводостойких минералов из каменных материалов или перевод их в нерастворимые соединения.

Способы защиты:

– **конструктивные меры** – устройство *водостоков* и создание *полированной* поверхности; *исключение* открытой пористости;

– **химические меры** – создание плотного *водонепроницаемого* слоя на поверхности камня следующими способами:

1) **флюатирование** – *пропитка* карбонатных пород солями *кремнефтористой кислоты*, например, флюатом магния, который химически связывает карбонаты, образуя *нерастворимые* химические соединения:



некарбонатные каменные породы предварительно обрабатывают водными растворами кальциевых солей;

2) **гидрофобизация** – *пропитка* пористого камня водооталкивающими (*гидрофобными*) составами (кремнийорганические жидкости, растворы парафина или стеарина в растворителе и т. д.);

3) пропитка раствором *мономера* с последующей полимеризацией превращение в водонерастворимое высокомолекулярное соединение.

Контрольные вопросы

1. Горные породы и их классификация?
2. Основные породы и породообразующие минералы?
3. Магматические породы. Происхождение. Основные виды и свойства каменных строительных материалов из этих пород.
4. Генетическая классификация горных пород.

4 НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

Неорганические вяжущие вещества представляют собой искусственные порошки, способные при смешивании с водой (в отдельных случаях с растворами некоторых солей) образовывать *вяжущее тесто*, которое, *твердея*, постепенно переходит в *вяжущий камень*. В зависимости от *среды твердения* неорганические вяжущие вещества подразделяют на группы:

1-я группа – **воздушные вяжущие** (вяжущие воздушного твердения), например, воздушная известь, гипсовое вяжущее, магнезиальное вяжущее, растворимое стекло, которые затворяются водой, а твердеют в *воздушной среде*;

2-я группа – **гидравлические вяжущие** (вяжущие гидравлического твердения), например, гидравлическая известь, романцемент, портландцемент, которые затворяются *водой* и твердеют в *воде* или во влажных условиях, исключающих сушку;

3-я группа – **автоклавные вяжущие** (вяжущие автоклавного твердения), например, известково-кремнеземистое вяжущее и известково-нефелиновое вяжущее, которые затворяются *водой*, а твердеют в *среде насыщенного пара* в автоклавах при температуре больше 100 °С (175 °С) и *давлении* больше атмосферного (0,9–1,6) МПа.

Минералогический состав гидравлических вяжущих, характеризуется наличием в их составе силикатов $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, *алюминатов* $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и *ферритов* кальция $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Химический состав сырья и гидравлические свойства вяжущего характеризуют *гидравлическим*, или *основным модулем*, m_o :

$$m_o = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}; \quad (4.1)$$

для воздушной извести $m_o > 9$; для гидравлической извести $m_o = (1,7-9)$; для романцеента $m_o = (1,1-1,7)$; для портландце-мента $m_o = (1,4-2,1)$.

4.1 Гипсовые вяжущие

Гипсовые вяжущие, или *гипсы* – это воздушные вяжущие, состоящие в основном из **полуводного гипса** и получаемые тепловой обработкой сырья с последующим помолом.

Сырье – для изготовления гипса используют сырье, содержащее сернокислый кальций – **двуводный гипс** $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

В зависимости от температуры термообработки получают два вида гипсовых вяжущих:

низкообжиговые – получают тепловой обработкой двуводного гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ при температурах 160–190 °С (строительный, формовочный, высокопрочный гипс);

высокообжиговые – изготавливают путем обжига гипсового сырья при температурах более 600 °С.

СТРОИТЕЛЬНЫЙ ГИПС НИЗКООБЖИГОВЫЙ

Строительный гипс низкообжиговый получают термической обработкой **двуводного гипса** $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ при температуре 160–180 °С до получения **полуводного гипса** $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$.

В зависимости от условий получения различают *две модификации* низкообжигового гипсового вяжущего:

α -гипс – получают при *давлении больше атмосферного* в автоклавах, имеет крупные кристаллы, обладает повышенной прочностью и пониженной водопотребностью;

β -гипс – получают при *атмосферном давлении* в варочных котлах, имеет мелкие кристаллы, обладает более низкой прочностью и повышенной водопотребностью по сравнению с *α -гипсом*.

СТАНДАРТНЫЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНОГО ГИПСА

Истинная плотность низкообжигового строительного гипса составляет $2,5 \text{ г/см}^3$.

Тонкость помола – это масса остатка гипсового вяжущего (в процентах от массы пробы гипса) на сите № 02 с ячейками размером в свету $0,2 \text{ мм}$. Тонкость помола является характеристикой *дисперсности* строительного гипса (таблица 4.1).

По тонкости помола, определяемой остатком на сите с отверстием размером $0,2 \text{ мм}$, гипсовые вяжущие делятся на три группы:

- *грубого* помола (остаток на сите не более 30 %);
- *среднего* помола (остаток на сите не более 15 %);
- *тонкого* помола (остаток на сите не более 2 %).

Таблица 4.1 – Характеристика гипса по тонкости помола

Вид вяжущего	Индекс степени помола	Максимальный остаток на сите с размерами ячеек в свету $0,2 \text{ мм}$, проценты, не более
Грубого помола	<i>I</i>	23
Среднего помола	<i>II</i>	14
Тонкого помола	<i>III</i>	2

Нормальная густота – это масса воды (в процентах от массы вяжущего), необходимая для получения гипсового теста стандартной консистенции (диаметр *расплыва* по вискозиметру Суттарда $180 \pm 5 \text{ мм}$). Нормальная густота является характеристикой *водопотребности* строительного гипса.

Чем меньше *водопотребность* гипсового вяжущего, тем более плотный и прочный гипсовый камень можно из него получить при прочих равных условиях.

Это объясняется тем, что для получения теста *нормальной густоты* гипсовое вяжущее требует 50–70 % воды, хотя по уравнению гидратации химически связывается только

18,6 % воды от массы гипсового вяжущего. Химически несвязанная вода постепенно испаряется, формируя *пористость* гипсового камня, что отрицательно влияет на его прочность.

Сроки схватывания – это условная оценка *скорости* твердения вяжущего. Различают «начало схватывания» и «конец схватывания».

Начало схватывания – это *интервал времени* от начала *смешения* вяжущего с водой до того момента, когда игла прибора Вика *впервые не дойдет* до нижней плоскости цилиндрического образца из гипсового теста.

Конец схватывания – это *интервал времени* от начала *смешения* вяжущего с водой до того момента, когда игла прибора Вика впервые внедрится в тело гипсового камня *не более, чем на 1 мм*.

По срокам схватывания строительный гипс делится на три вида (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Характеристика гипса по степени твердения

Вид вяжущего	Индекс сроков твердения	Сроки схватывания, мин	
		начало, не ранее	конец, не позднее
Быстро твердеющий	<i>A</i>	2	15
Нормально твердеющий	<i>B</i>	6	30
Медленно твердеющий	<i>B</i>	20	Не нормируется

Марка гипса – это количественная оценка *прочностных характеристик* гипсового вяжущего (на сжатие и изгиб), которые определяют испытанием образцов-балочек размером 40 × 40 × 160 мм, изготовленных из гипсового теста *нормальной густоты* после 2 ч *твердения* (в возрасте 2 ч).

Подразделяют 12 марок гипса в зависимости от прочности на сжатие и прочности при изгибе, от Г–2 до Г–25 (таблица 4.3).

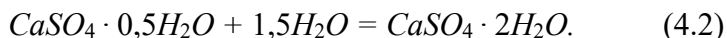
Пример обозначения марки гипса – Г-4 (гипс строительный с прочностью на сжатие не менее 4 МПа).

Таблица 4.3 – Марка строительного гипса

Марка вяжущего	Минимальный предел прочности образцов-балочек, МПа (кгс/см ²)	
	при сжатии	при изгибе
Г-2	2 (20)	1,2 (12)
Г-3	3 (30)	1,8 (18)
Г-4	4 (40)	2,0 (20)
Г-5	5 (50)	2,5 (25)
Г-6	6 (60)	3,0 (30)
Г-7	7 (70)	3,5 (35)
Г-10	10 (100)	4,5 (45)
Г-13	13 (130)	5,5 (55)
Г-16	16 (160)	6,0 (60)
Г-19	19 (190)	6,5 (65)
Г-22	22 (220)	7,0 (70)
Г-25	25 (250)	8,0 (80)

Твердение гипсового вяжущего – это сложный физико-химический процесс, в котором происходит реакция *гидратация* полуводного гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ и процессы *коллоидации* и *кристаллизации* двухводного гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, сросшиеся кристаллы которого образуют гипсовый камень.

Реакция гидратации гипсового вяжущего является *экзотермической* и имеет следующий вид:



Процессы гидратации, коллоидации и кристаллизации налагаются друг на друга и продолжаются до тех пор, пока весь *полуводный гипс* $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ не перейдет в *двухводный гипс* $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (практически через 15–40 мин после момента затворения).

К этому времени достигается максимальная прочность системы во *влажном* состоянии. Дальнейшее увеличение прочности гипсового камня происходит вследствие его *высыхания*, поэтому сушка является необходимой операцией в технологии гипсовых материалов. При полном высыхании рост прочности прекращается.

Для *замедления схватывания* вводят специальные добавки: мездровый клей; добавки *СДБ* или *ЛСТ* в количестве 0,1–0,3 % от массы гипса. Механизм действия этих веществ заключается в том, что они, *абсорбируясь* на зернах полуводного гипса, *препятствуют* реакции гидратации, поэтому процесс твердения гипсового теста замедляется.

Для *ускорения схватывания* в гипс добавляют вещества, *повышающие* скорость гидратации полуводного гипса (поваренная соль $NaCl$, сульфат натрия Na_2SO_4) или вещества, образующие дополнительные *центры кристаллизации* (молотый двухводный гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

ОСОБЫЕ СВОЙСТВА НИЗКООБЖИГОВОГО ГИПСА

При твердении гипс *увеличивается в объеме* до 1 %.

Это обеспечивает *самоуплотнение* гипсового камня, что используется при отливке художественных изделий и снятии копий.

Гипсовое тесто имеет *высокую скорость* твердения.

Во влажной среде гипсовый камень характеризуется *ползучестью* увеличением необратимых деформаций без увеличения нагрузки.

Гипсовый камень имеет *низкую водостойкость* – при увлажнении *прочность* его снижается, а при высыхании восстанавливается.

ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ ГИПСА

К этой группе относятся изделия, изготовленные на основе гипсовых и гипсоцементно-пуццолановых вяжущих.

В зависимости от сырья различают:

– **гипсовые изделия**, которые изготавливают из гипсового теста без добавок или с добавками органических волокнистых или молотых минеральных наполнителей;

– **гипсобетонные изделия**, при изготовлении которых применяют гипсобетонную смесь, состоящую из гипса, воды и пористых заполнителей – минерального происхождения (топливные и доменные шлаки, ракушечник, туфовый и пемзовый щебень, керамзит, аглопорит) и органического происхождения (древесные опилки и шерсть, сечка камыша, солома).

Технология производства включает следующие операции:

- 1) дозирование всех составляющих смеси;
- 2) приготовление гипсового теста;
- 3) формование изделий;
- 4) распалубка (извлечение изделий из форм);
- 5) сушка изделий.

Свойства изделий:

- 1) средняя плотность гипсовых изделий 800–1100 кг/м³, гипсобетонных – 1200–1500 кг/м³;
- 2) прочность на сжатие гипсового камня – 2,5–10 МПа;
- 3) характерные особенности гипсового теста – быстрое твердение и хорошие формовочные свойства;
- 4) гипсовые изделия хорошо поддаются механической обработке и легко окрашиваются.

Недостатки изделий на основе гипса:

- 1) низкая *водостойкость* (ограничение применения при влажности воздуха более 60 %);
- 2) высокая *ползучесть* во влажных условиях;
- 3) *хрупкость* при применении в тонкостенных элементах;
- 4) стальная арматура в гипсобетонных изделиях *корродирует* (ржавеет).

Наличие стальной арматуры требует тщательной защиты от коррозии или ее замены. Роль стальной арматуры могут выполнять органические волокна, равномерно распределенные в самой формовочной массе, или армирующие материалы, являющиеся частью конструкции самого изделия (картонная оболочка в гипсовой штукатурке, деревянный каркас из реек, камыш в плитах).

ВИДЫ ГИПСОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Гипсобетонные панели применяются для устройства перегородок, не несущих нагрузки, и имеют прочность 3,5 МПа и среднюю плотность 1250–1400 кг/м³.

Санитарно-технических кабины изготавливают из гипсобетона на гипсоцементно-пуццолановых вяжущих, имеющих прочность 6–7 МПа.

Панели для основания пола под линолеум, плитку из пластмасс, мастичные полы, имеют прочность 7,5 МПа и среднюю плотность 1300 кг/м³.

Гипсобетонные плиты для внутренних перегородок имеют размер 800×400 мм при толщине 80–100 мм, прочность 3–4 МПа, плотность 1000–1400 кг/м³. Могут быть сплошными, пустотелыми и армированными камышом или штукатурной дранью.

Гипсовые обшивочные листы (сухая штукатурка) представляет собой тонкие плиты, внутренняя часть которых состоит из затвердевшего гипсового теста, со всех сторон оклеенного картоном.

Гипсоволокнистые листы изготавливают из гипсовой массы и измельченной бумажной макулатуры. Применяют для отделочных работ взамен «мокрых» штукатурных процессов.

4.2 Воздушная известь

Воздушная известь – продукт обжига карбонатных пород при температуре 700–900 °С до полного удаления диоксида углерода CO_2 и образования оксидов кальция CaO .

Сырье – карбонатные породы (известняк, мел, ракушечник, в которых примеси глины и кварцевого песка не превышают 6 %).

Технология получения:

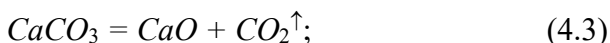
- 1) подготовка карбонатного сырья (дробление);
- 2) обжиг при температуре 700–900 °С;
- 3) охлаждение и складирование.

Реакция обратима и зависит от температуры и парциального давления углекислого газа CO_2 .

Продукт обжига извести CaO называют **комовой негашеной известью**.

Свойства комовой негашеной извести:

- 1) по внешнему виду представляет собой каменный материал *белого* цвета;
- 2) *средняя* плотность комовой извести равна 1,2 г/см³;
- 3) основная химическая реакции при обжиге:



4) материал имеет развитую и равномерно распределенную *открытую пористость*, примерно 50 % (при обжиге масса известняка уменьшается в 2 раза, а объем всего на 10–12 %);

5) состоит из мелких *кристаллов* CaO (0,5–2 мкм);

6) имеет высокую реакционную способность при взаимодействии с водой за счет 50%-й открытой пористости и развитой реакционной поверхностью за счет высокой суммарной площади пор;

7) реакция гидратации является высоко *экзотермической*, выделяемое тепло может вызвать опасное *парообразование* воды, поэтому **комовую известь вводят в воду**, а не наоборот;

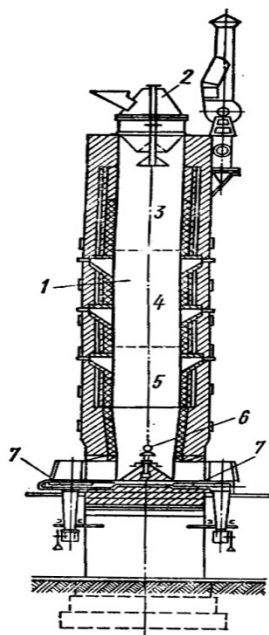


Рисунок 4.1 – Шахтная печь для обжига извести:

- 1 – шахта печи; 2 – загрузочный механизм;
 3 – зона подогрева; 4 – зона обжига; 5 – зона охлаждения;
 6 – гребень; 7 – разгрузочный механизм

8) при **недожоге** частицы неразложившегося карбоната кальция CaCO_3 не способны к взаимодействию с водой и образуют инертный балласт;

9) при **пережоге** (превышении оптимальной температуры обжига) образуются крупные кристаллы оксида кальция CaO .

При смешении с водой *реакция гидратации* этих пережженных крупных кристаллов протекает с *задержкой* во времени, что может привести к разрушению материала, изготовленного на таком вяжущем, в процессе его эксплуатации.

Комовая известь – это *полуфабрикат*, из которого получают два вяжущих продукта: *гашеную известь* и *молотую негашеную известь*.

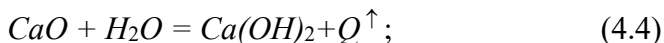
ГАШЕНАЯ ИЗВЕСТЬ

Гашеную известь получают путем смешения ее с водой, при этом происходит самопроизвольное *тонкодисперсное измельчение* вяжущего и бурное *тепловыделение*.

Механизм гашения извести следующий:

1) вода интенсивно поглощается по объему кусками комовой извести за счет большой открытой пористости (50 %);

2) одновременно происходит *экзотермическое* химическое взаимодействие воды с оксидом кальция CaO и образование гидроксида кальция $Ca(OH)_2$ с выделением большого количества тепла Q согласно химической реакции:



3) реакция гидратации является экзотермической и сопровождается выделением большого количества теплоты Q , которая сразу переводит часть воды в *пар*;

4) пар вызывает в извести растягивающие *напряжения*, под действием которых происходит самопроизвольное *измельчение* комовой извести в тонкий порошок (частицы гашеной извести значительно меньше частиц портландцемента).

В зависимости от *количества воды*, взятой для гашения извести, можно получить три вида вяжущего продукта – *известь-пушонку, известковое тесто, известковое молоко*:

1) **известь-пушонка** (на 1 часть массы комовой извести берут 0,6 части воды); представляет собой *тонкий порошок* белого цвета; объем порошка в 2–3 раза превышает объем исходной комовой извести; *соотношение* между известью и водой по массе 1 : 0,6;

2) **известковое тесто** (на 1 часть массы комовой извести берут 2–3 части воды); представляет собой пастообразную концентрированную *водную суспензию* плотностью 1,4 г/см³; *соотношение* между известью и водой по массе не более 1 : 3;

3) **известковое молоко** (на 1 часть массы комовой извести берут более 3 частей воды); известковое молоко имеет вид *жидкости* с плотностью менее $1,3 \text{ г/см}^3$; *соотношение* между известью и водой по массе более 1 : 3.

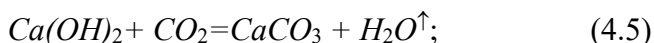
МОЛОТАЯ НЕГАШЕНАЯ ИЗВЕСТЬ

Молотую негашеную известь получают механическим размолотом *комовой* негашеной извести в мельницах.

По *химическому составу* молотая негашеная известь подобна исходной комовой извести. При помоле иногда вводят минеральные добавки (шлаки, золы, песок и др.). Характеризуется *высокой реакционной способностью* и *тепловыделением* при затворении водой.

Твердение гашеной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ осуществляется при положительных *температурах* в результате двух одновременно протекающих процессов:

1) процесс *карбонизации* характеризуется получением карбоната кальция CaCO_3 за счет взаимодействия гашеной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с углекислым газом CO_2 из окружающего воздуха:



2) процесс кристаллизации характеризуется *испарением* воды H_2O и *срастанием* между собой кристаллов карбоната кальция CaCO_3

Особенности твердения гашеной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$:

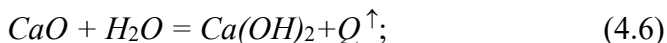
1) процесс твердения характеризуется *низкой скоростью* из-за малой *концентрации* CO_2 в воздухе и *образования плотной пленки* карбоната кальция CaCO_3 , затрудняющей доступ углекислоты во внутренние слои раствора;

2) *сушка* ускоряет процесс твердения за счет *удаления* выделяющейся воды;

3) процесс карбонизации происходит *только во влажных условиях* и должен *опережать процесс сушки*, так как после высушивания процесс карбонизации прекращается.

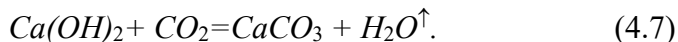
Твердение молотой негашеной извести CaO :

1) при добавлении воды в результате *экзотермической* реакции гидратации образуется гидроксид кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$:



2) одновременно происходит *коллоидация и кристаллизация* гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$;

3) происходит *карбонизация* гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с получением карбоната кальция CaCO_3 за счет взаимодействия с углекислым газом CO_2 из окружающего воздуха и испарения воды H_2O :



Особенности твердения молотой негашеной извести CaO :

- 1) процесс твердения протекает сравнительно *быстро*;
- 2) процесс твердения характеризуется *тепловыделением*, что способствует ускорению твердения и росту прочности.

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНОЙ ИЗВЕСТИ

Воздушную известь используют для кладочных и штукатурных *растворов*, эксплуатируемых в *воздушно-сухих условиях*, а также для *окрашивания* строительных конструкций огнестойкими *красочными составами*.

Воздушная известь, гашеная и негашеная, используется для производства материалов *автоклавногo твердения* (силикатный кирпич, пеносиликат, газосиликат).

Известковое тесто на основе воздушной извести используется в качестве *пластифицирующей и водоудерживающей добавки* к строительным растворам, что связано с высокой *дисперсностью* частиц извести и хорошей *водоудерживающей способностью*.

4.3 Магнезиальное вяжущее

Магнезиальное вяжущее – это тонко измельченный продукт обжига *магнезита* $MgCO_3$ или *доломита* $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ при температуре 500–700 °С, т. е. ниже температуры разложения входящего в его состав *углекислого кальция* $CaCO_3$. Каустический доломит в основном состоит из оксида магния MgO и карбоната кальция $CaCO_3$. *Оксид магния* MgO является активной частью вяжущего, а *карбонат кальция* $CaCO_3$, не обладающий вяжущими свойствами, является инертным наполнителем.

Каустический магнезит и доломит **затворяют** не водой, а водным *раствором* хлористого $MgCl_2$ или сернокислого магния $MgSO_4$, который повышает растворимость оксида магния MgO и резко ускоряет процесс твердения. При этом, наряду с гидратацией оксида магния MgO и получением его гидроокиси $Mg(OH)_2$, происходит образование *гидрооксихлорида магния* $3MgO \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$, что обеспечивает повышение прочности при сжатии до 40–70 МПа на каустическом магнезите и до 10–30 МПа на каустическом доломите.

Свойства магнезиальных вяжущих:

- 1) имеют высокую *износостойкость* и большую *прочность* вяжущего камня при сжатии и изгибе;
- 2) магнезиальные вяжущие вещества характеризуются высокой *адгезией к органическим наполнителям* (древесным опилкам и стружке), а также *предохраняют* органический наполнитель от загнивания.

Применение магнезиальных вяжущих:

- используют для устройства влагостойких, не истираемых «теплых» полов;
- **ксилолит** – материал, включающий *магнезиальное вяжущее* и *древесные опилки* в качестве наполнителя; ксилолит прочен, не истираем, водостоек;

– **фибролит** – материал, включающий *магнезиальное вяжущее* с использованием в качестве наполнителя *древесной стружки*; фибролит прочен, износостоек, водостоек.

4.4 Растворимое стекло

Растворимое (жидкое) стекло – это *продукт переохлаждения* силикатного расплава, полученного из сырьевой смеси, состоящей из *кварцевого песка* SiO_2 и *плавней*. Для понижения температуры плавления до температуры 1100–1400 °С используются плавни: *сода* $NaCO_3$ или *поташ* K_2CO_3 . Образовавшийся силикатный расплав при быстром охлаждении образует стекловатые полупрозрачные куски, называемые **силикат-глыбой**, желтого или голубоватого оттенка в зависимости от вида плавня.

По химическому составу растворимое стекло представляет собой натриевый $Na_2O \cdot nSiO_2$ или калиевый $K_2O \cdot SiO_2$ силикат, где $n = 2,5–4$ – **модуль стекла**.

В строительстве *растворимое стекло* применяют в виде водного раствора, который получают в результате воздействия на силикат-глыбу *водяного пара*, и называют *жидким стеклом*.

Свойства жидкого стекла:

- плотность – 1,3–1,5 г/см³;
- содержит 50–70 % воды.

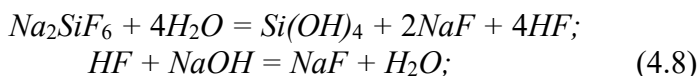
Твердение жидкого стекла:

- 1) сначала происходит *гидролиз* силикатов в воде с образованием геля кремниевой кислоты $Si(OH)_4$, обладающей вяжущими свойствами;
- 2) затем идет *испарение* жидкой фазы (воды);
- 3) одновременно происходит *коагуляция и уплотнение* коллоидного кремнезема.

Особенности твердения растворимого стекла:

- 1) процесс твердения *ускоряется* при *повышении* температуры твердения;

2) процесс твердения *ускоряется* при введении *ускорителя твердения*, в качестве которого наибольшее применение получил *кремнефтористый натрий* Na_2SiF_6 :



3) при использовании *кремнефтористого натрия* Na_2SiF_6 процесс твердения характеризуется увеличением скорости гидролиза и образованием малорастворимого фтористого натрия NaF .

Применение жидкого стекла:

- натриевое жидкое стекло $Na_2O \cdot nSiO_2$ применяют для изготовления *кислотоупорных и жароупорных бетонов*;
- калиевое жидкое стекло $K_2O \cdot SiO_2$ применяют преимущественно в производстве *огнестойких силикатных красок*.

Кислотоупорный цемент включает в себя *натриевое жидкое стекло* $Na_2O \cdot nSiO_2$, тонко измельченный *кислотоупорный наполнитель* (кварц, кварцит, диабаз) и *ускоритель твердения* (кремнефтористый натрий Na_2SiF_6).

Свойства кислотоупорного цементного камня:

- 1) кислотоупорный цементный камень *сопротивляется* большинству кислот (кроме фтористо-водородной HF , кремнефтористо-водородной H_2SiF_6 и фосфорной);
- 2) сроки *схватывания* кислотоупорного цементного камня – 0,3–8 ч;
- 3) кислотоупорный цементный камень характеризуется пределом прочности *при растяжении* через 28 сут – не менее 2,0 МПа;
- 4) *кислотостойкость* кислотоупорного цементного камня – не менее 93 %;
- 5) кислотоупорный цементный камень не водостоек, не щелочестоек, не хладостоек ниже $(-20)^\circ C$.

4.5 Гидравлическая известь. Романцемент

Гидравлическая известь является вяжущим, сырьем для изготовления которого служат мергелистые *известняки*, содержащие 6–20 % равномерно распределенной *глины*.

Технология получения гидравлической извести включает в себя подготовку сырья и его обжиг.

При обжиге сначала происходит разложение карбоната кальция $CaCO_3$ на оксид кальция CaO и углекислый газ CO_2 , а глинистых минералов на аморфные окислы кремнезема SiO_2 и глинозема Al_2O_3 и оксида железа Fe_2O_3 . Оксид кальция придает извести воздушные свойства.

При 1000–1100 °С часть оксида кальция CaO взаимодействует в твердом состоянии с оксидами SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , образуя низко основные силикаты кальция $CaO \cdot SiO_2$, алюминаты кальция $CaO \cdot Al_2O_3$ и ферриты кальция $CaO \cdot Fe_2O_3$. Силикаты, алюминаты и ферриты кальция придают извести гидравлические свойства.

Химический состав

Гидравлическая известь состоит из различных соединений, часть которых – оксид кальция CaO и оксид магния MgO обуславливает свойства извести как воздушного вяжущего, а часть – силикаты кальция $CaO \cdot SiO_2$, алюминаты кальция $CaO \cdot Al_2O_3$ и ферриты кальция $CaO \cdot Fe_2O_3$ как гидравлического вяжущего.

Чем больше в составе гидравлической извести кислотных соединений, тем быстрее она твердеет и выше ее прочность.

Твердение

Для твердения гидравлической извести вначале необходимо, как и для воздушной извести, воздушно-сухие условия, а затем – влажные, чтобы обеспечить гидратацию силикатов, алюминатов и ферритов.

Различают слабо гидравлическую $m_o = (4,5-9)$ и сильно гидравлическую $m_o = (1,7-4,5)$ известь.

Свойства

Прочность при сжатии известковых растворов должна быть для слабо гидравлической извести не менее 1,7 МПа и для сильно гидравлической не менее 5 МПа.

Романцемент является разновидностью сильно гидравлической извести с *модулем основности* $m_o < 1,7$.

Он целиком состоит из низко основных *силикатов* $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, *алюминатов* $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и *ферритов кальция* $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Марки романцемента 25, 50 и 100.

4.6 Портландцемент

Портландцемент – продукт тонкого помола *клинкера*, получаемого обжигом до спекания (1450°C) сырьевой смеси, состоящей из *кальциевых карбонатных* пород и *глинистых* пород, взятых в соотношении по массе 3 : 1.

При помоле клинкера в него добавляют 1,5–3,5 % *двуводного гипса* $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ для замедления *сроков схватывания* получаемого портландцемента.

Клинкер – это *искусственный* камень, полученный *спеканием* горных пород.

Клинкер включает в себя четыре основных искусственных минерала:

- 1) *трехкальциевый силикат* $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$;
- 2) *двухкальциевый силикат* $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$;
- 3) *трехкальциевый алюминат* $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$;
- 4) *четырекальциевый алюмоферрит* $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Минералогический состав клинкера приведен в таблице 4.2, а микрофотография клинкера на рисунке 4.3.

Таблица 4.2 – Минералогический состав клинкера

Название минерала	Химическая формула	Обозначение	Количество, процент по массе
Трехкальциевый силикат – <i>алит</i>	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S	40–65
Двухкальциевый силикат – <i>белит</i>	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S	15–40
Трехкальциевый алюминат – <i>целит I</i>	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	5–15
Четырехкальциевый алюмоферрит – <i>целит II</i>	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF	10–20

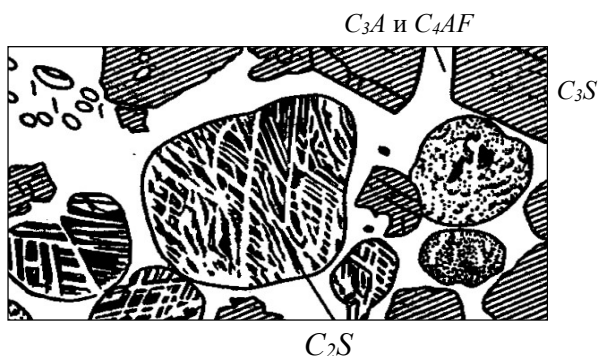


Рисунок 4.3 – Микрофотография протравленного шлифа портландцементного клинкера (по Г. М. Горчакову и Ю. М. Баженову)

Химический состав клинкера должен находиться в следующих пределах: CaO – 63–66 %; SiO_2 – 21–24 %; Al_2O_3 – 4–8 %; Fe_2O_3 – 2–4 %; суммарное количество этих окислов должно составлять 95–97 %.

Сырье для получения портландцемента включает такие сырьевые материалы, которые содержат много **карбонатов кальция** $CaCO_3$ (известняки) и **алюмосиликатов** $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ (глины, доменные шлаки, нефелиновый шлак).

Для обеспечения нужного химического состава сырьевой смеси применяют **корректирующие добавки**, содержащие недостающие оксиды.

Например, повышают количество оксида кремния SiO_2 , добавляя в сырьевую смесь природные минералы (трепел, опока).

ТЕХНОЛОГИЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Технологический процесс основан на получении искусственного камня (*клинкера*) в условиях химического взаимодействия между компонентами сырьевой смеси в *пиропластическом состоянии* при температуре до 1450 °С.

В клинкер входит четыре искусственных минерала: *алиит* C_3S , *белит* C_2S , *целит I* C_3A , *целит II* C_4AF .

Основные технологические операции получения портландцемента:

1) **подготовка сырьевой смеси** (измельчение, дозирование и гомогенизация в шлам-бассейнах по «мокрому» способу, схема производства которого приведена на рисунке 4.4;

2) **обжиг до спекания** (осуществляют обычно во вращающихся цилиндрических печах);

3) **охлаждение и помол** получаемого клинкера в тонкий порошок; при помоле клинкера в него могут вводить различные специальные добавки (регулирующие сроки схватывания, пластифицирующие, гидрофобизирующие, окрашивающие и т. д.).

Обжиг сырьевой смеси является основной технологической операцией получения вяжущего.

Осуществляют обжиг по непрерывному циклу во вращающихся печах по принципу противотока – с одной стороны непрерывно подается сырьевая смесь, с другой – подается горячее дутье. Принято различать следующие зоны термообработки.

Зона **сушки** (до 200 °С) – сырьевая смесь подсушивается, превращаясь в комья, которые распадаются на более мелкие гранулы.

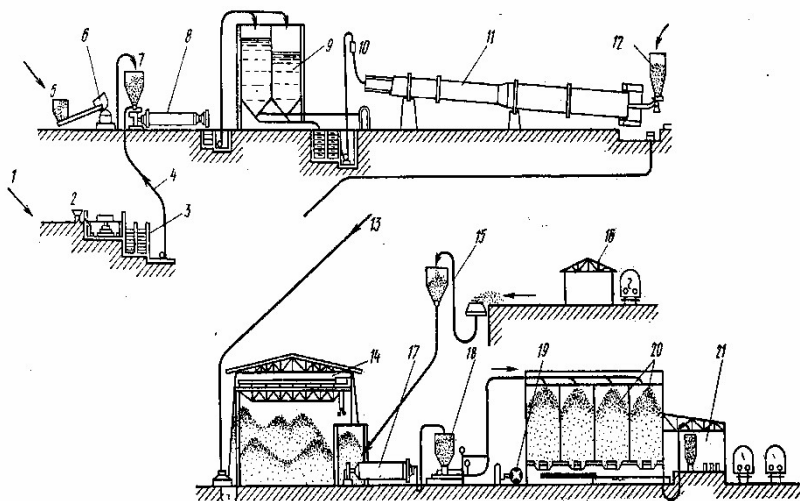


Рисунок 4.4 – Схема производства портландцемента по «мокрому» способу:

- 1 – подача глинистого сырья; 2 – подача воды; 3 – смешивание воды и глины; 4 – подача глиняной суспензии; 5 – подача известкового сырья; 6 – дробление; 7 – дозирование; 8 – помол в трубной мельнице; 9 – выдержка в шламбассейнах; 10 – дозирование; 11 – получение клинкера в обжиговой вращающейся печи; 12 – подача топлива; 13 – транспортирование клинкера; 14 – складирование клинкера; 15 – дробление и дозирование добавки гипса; 16 – складирование гипса; 17 – помол клинкера с добавкой гипса; 18 – пневмонасос; 19 – компрессор; 20 – склад (силоса) цемента; 21 – упаковка

Зона **подогрева** (200–700 °С) – выгорают органические примеси, удаляется химически связанная вода H_2O из глинистых минералов и образуется безводный минерал каолинит $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$.

Зона **декарбонизации** (700–1100 °С) – происходит процесс разложения (термической диссоциации) карбонатов кальция $CaCO_3$ и карбонатов магния $MgCO_3$ на CaO , MgO и CO_2 , процесс эндотермический, идущий с большим поглощением тепла. Алумосиликаты глины распадаются на отдельные оксиды

SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 с сильно разрыхленной структурой, оксид кальция CaO в твердом состоянии вступает в реакцию с продуктами распада глины с образованием низко основных силикатов $CaO \cdot SiO_2$, алюминатов $CaO \cdot Al_2O_3$ и ферритов кальция $CaO \cdot Fe_2O_3$.

Зона **экзотермических реакций** (1100–1300 °С) – обжигаемая масса, раскаляясь, образуют более основные соединения: целит I – $3CaO \cdot Al_2O_3$, целит II – $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$, обжигаемый материал агрегируется в гранулы.

Зона **спекания** (1300–1450 °С) – обжигаемая смесь частично расплавляется. В расплав переходят целит I – $3CaO \cdot Al_2O_3$, целит II – $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$, оксид кальция CaO и все легкоплавкие примеси сырьевой смеси. По мере появления расплава в нем растворяются белит – $2CaO \cdot SiO_2$ и оксид кальция CaO , которые, взаимодействуя друг с другом, образуют основной минерал клинкера – алит – $3CaO \cdot SiO_2$, который плохо растворяется в расплаве и вследствие этого выделяется из расплава в виде мелких кристаллов. Затем обжигаемый материал спекается в кусочки размером 4–25 мм, называемый **клинкером**.

Зона **охлаждения** (1300–1000 °С) – температура клинкера понижается и происходит окончательная фиксация его структуры и состава, включающего алит – $3CaO \cdot SiO_2$, белит – $2CaO \cdot SiO_2$, целит I – $3CaO \cdot Al_2O_3$, целит II – $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$, стекловидную фазу и второстепенные составляющие.

При выходе из печи клинкер быстро охлаждают, чтобы предотвратить образование крупных кристаллов и сохранить стекловидную фазу, обеспечивающую реакционную способность по отношению к воде.

После выдержки на складе (1–2 недели) клинкер превращают в портландцемент путем помола его в тонкий порошок,

добавляя небольшое количество двуводного гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ для замедления начала схватывания.

Минералогический состав цементного клинкера – это ориентировочное содержание основных четырех минералов в портландцементном клинкере, что составляет в процентах по массе:

алит – $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - \text{C}_3\text{S}$ – 40–65 %;

белит – $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - \text{C}_2\text{S}$ – 15–40 %;

целит I – $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}_3\text{A}$ – 5–15 %;

целит II – $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{C}_4\text{AF}$ – 10–20 %.

СТАНДАРТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Истинная плотность – 2,8–3,1 г/см³.

Насыпная плотность – 1,1–1,2 г/см³.

Тонкость помола – это масса *остатка* цементного вяжущего (в процентах от массы пробы) на сите № 008 с ячейками размером в свету 0,08 мм. *Остаток на сите* не должен превышать 14 %, что соответствует удельной поверхности цемента 2500–3000 см²/г.

Тонкость помола является *мерой дисперсности* портландцемента. Чем меньше остаток на сите, тем более тонкий помол имеет цементный клинкер.

С увеличением тонкости помола клинкера портландцемент *имеет* более развитую удельную реакционную поверхность, с другой стороны, **контракция** (стяжение) – явление уменьшения абсолютного объема цементного теста в процессе гидратации *ограничивает* верхний предел тонкости помола цементного клинкера до величины 6000 см²/г.

Нормальная густота измеряется *количеством воды* (в процентах от массы цемента), которая необходима для получения цементного теста стандартной (нормальной) вязкости.

Нормальная густота характеризует *водопотребность* портландцемента, которая характеризуется минимальным количеством воды для *смачивания* поверхности материала.

Нормальная густота зависит: от *минерального состава* клинкера и от *тонкости помола* клинкера (чем меньше частицы в единице массы или объема, тем больше их водопотребность за счет более развитой поверхности смачивания).

Для получения пластичного цементного теста требуется 40–60 % воды. По уравнению гидратации химически *связывается* только 24–26 % воды от массы портландцемента. Химически *несвязанная вода*, постепенно испаряясь, формирует *пористость* цементного камня, которая понижает его плотность, прочность и долговечность. Чем ниже *водопотребность* портландцемента, тем более плотный и прочный цементный камень можно получить из цементного теста при прочих равных условиях.

Сроки схватывания – это условная оценка скорости твердения вяжущего. Различают «начало схватывания» и «конец схватывания», которые определяют на цементном тесте *нормальной густоты* с помощью иглы прибора Вика:

– **начало схватывания** – это *интервал времени* от начала смешения вяжущего с водой до того момента, когда игла прибора Вика *впервые не дойдет* до нижней плоскости цилиндрического образца из цементного теста на 1 мм; начало схватывания цементного теста должно наступать *не ранее*, чем через 45 мин от начала затворения;

– **конец схватывания** – это *интервал времени* от начала смешения вяжущего с водой до того момента, когда игла прибора Вика *впервые внедрится* в тело цементного камня не более чем на 3 мм; конец схватывания цементного теста должен наступать *не позднее*, чем через 10 ч после начала затворения.

Равномерность изменения объема цементного камня

Образцы цементного камня, изготовленного из теста *нормальной густоты*, после 24 ч *твердения* в стандартных условиях

кипятят 3 ч в воде. Образцы *не должны* деформироваться и иметь радиальные трещины. Неравномерное изменение объема цементного камня связано с наличием в клинкере свободных оксидов кальция CaO и магния MgO , которые при гидратации *расширяются*, вызывая местные деформации. Цементный камень, не обладающий равномерностью изменения объема, *нельзя применять* в строительстве.

Марка портландцемента определяется испытанием образцов-балочек размером $40 \times 40 \times 160$ мм, изготовленных из цементно-песчаного раствора с использованием стандартного песка. Цементно-песчаный раствор готовят *нормальной консистенции*, определяемой по стандартной методике с использованием встряхивающего столика. Испытания образцов-балочек на прочность при сжатии и изгибе проводят после 28 *сут* *твердения в нормальных условиях* (температура 20 ± 2 °С, относительная влажность 100–2 %).

Активность портландцемента – фактическая прочность при сжатии стандартных образцов-балочек. **Марка портландцемента** – это *уменьшенное* значение активности цемента до величины ближайшего значения в действующем *стандартном перечне марок*. Марка портландцемента не может быть больше его активности. Например, портландцемент с активностью 449 кгс/см² имеет марку М400.

ТВЕРДЕНИЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Процесс твердения составляющих цементного клинкера описывается следующими химическими реакциями:

1) гидратация **алита** – трехкальциевого силиката $3CaO \cdot SiO_2$:



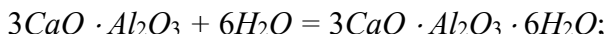
в результате реакции получается *гидросиликат кальция* $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ и образуется *известь* $Ca(OH)_2$;

2) гидратация **белита** – двухкальциевого силиката $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$:



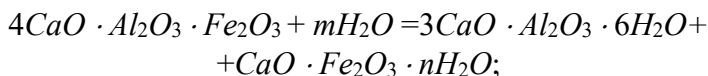
в результате реакции получается **гидросиликат кальция** $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и образуется **известь** $\text{Ca}(\text{OH})_2$;

3) гидратация **целита I** – трехкальциевого алюмината $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$:



в результате реакции получается **гидроалюминат кальция** $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;

4) гидратация **целита II** – четырехкальциевого алюмоферрита $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$:



в результате реакции получается **гидроалюминат кальция** $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и **гидроферрит кальция** $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Степень гидратации клинкерных минералов процентах от полной гидратации приведена в таблице 4.2, а протекание процесса гидратации цемента и развитие структуры цементного камня во времени показаны на рисунке 4.5.

Таблица 4.2 – Степень гидратации клинкерных минералов
(по Ю. М. Бутту и С. Д. Окорочкову)

Минералы	Гидратация в течение				
	3 сут	7 сут	28 сут	3 мес	6 мес
C_3S	36	46	69	93	94
C_2S	7	11	11	29	30
C_3A	82	82	84	91	93
C_4AF	70	71	74	89	91

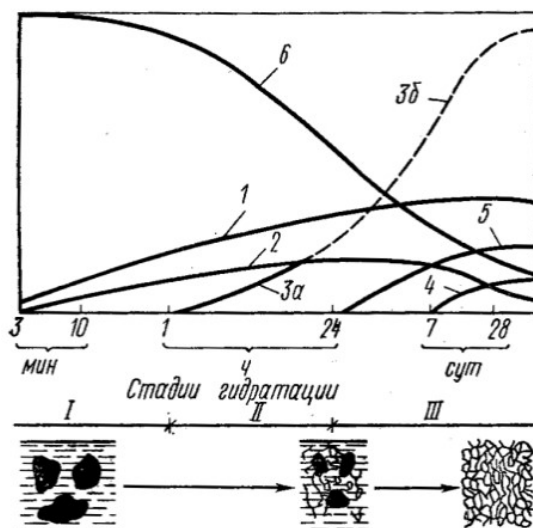


Рисунок 4.5 – Процесс гидратации цемента и развитие структуры цементного камня во времени (по Лихтеру и Рихардцу):

- 1 – гидроксид кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$; 2 – этtringит $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$; 3а – гидросиликаты кальция (длинные волокна); 3б – то же (короткие волокна); 4 – $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$; 5 – $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$; 6 – кривая изменения объема пор; I – неустойчивая структура; II – формирование основной структуры; III – конденсация и получение устойчивой структуры

Минералогический состав цементного камня включает в себя четыре основных минерала: гидросиликат кальция $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, гидроалюминат кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, гидроферрит кальция $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и гидроксид кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, причем последний находится в виде твердого образования, равномерно распределенного среди других минералов цементного камня.

Микроструктура затвердевшего цементного камня представляет собой микроскопически неоднородную *дисперсную систему*, включающую цементные зерна, еще не вступившие

в реакцию, окруженную гелеобразными кристаллическими новообразованиями.

Цементный камень имеет пористость различного размера и происхождения:

- **поры геля** (менее 0,1 мкм) вокруг цементных зерен;
- **капиллярные поры** (0,1–10 мкм) между агрегатными частицами геля;
- **воздушные поры** (от 50 мкм до 2 мм), образованные во влеченным воздухом.

При образовании цементного камня имеет место *усадка* за счет *контракции* (стяжения).

Это явление усиливается с уменьшением размера цементных частиц при помоле цементного клинкера.

Механизм образования пористости цементного камня

Количество воды m_1 , необходимое для полной гидратации цемента, составляет 24–26 % от массы портландцемента $m_{ц}$.

Количество воды m_2 , необходимое для получения пластичного теста, составляет 40–60 % от массы портландцемента $m_{ц}$.

Не связанная химически свободная вода ($m_2 - m_1$) при испарении формирует капиллярную и воздушную пористость, что снижает прочность, увеличивает водопоглощение и уменьшает морозостойкость цементного камня.

ОСОБЕННОСТИ ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

С увеличением *степени гидратации* – количества *прореагировавшей* с водой части цемента к общей массе цемента – прочность цементного камня растет.

Повышение *тонкости помола* увеличивает скорость химических реакций при твердении и полноту использования вяжущих свойств цемента, а также увеличивает прочность цементного камня.

Повышение температуры твердения при одновременном обеспечении *влажности* ускоряет процесс твердения. Тверде-

ние портландцемента практически *прекращается*, если цементный камень высохнет. После увлажнения сухой цементный камень *не способен* к дальнейшему нормальному твердению. Для исключения высыхания цементного камня в процессе его твердения в тесто вводят *водоудерживающие добавки* (известковое тесто, глины) или *защищают камень* от высыхания в процессе твердения (укрытие поверхности, постоянное смачивание водой).

Понижение температуры твердения замедляет процесс твердения. Замерзший камень после оттаивания *способен* к дальнейшему твердению, но при этом *не всегда* может быть достигнута проектная прочность. Для обеспечения твердения при отрицательных температурах используют *противоморозные добавки* – соли сильных кислот, так как температура заморозания водных солевых растворов всегда ниже температуры заморозания воды.

Путем рационального подбора минерального *состава клинкера* и условий *твердения* цементного теста можно получить структуру камня, удовлетворяющего конкретным эксплуатационным условиям.

Динамика нарастания прочности цементного камня:

3 сут – 30–35 % от марки цемента; 7 сут – 60–70 % от марки цемента; 28 сут – 100 % от марки цемента; затем твердение замедляется, но продолжается месяцы и годы, и конечный результат *может превысить* марку цемента.

Тепловыделение при твердении цемента – реакция гидратации портландцемента носит *экзотермический* характер и количественно определяется следующими факторами:

1) минеральным составом портландцемента – при полной гидратации 1 кг алита C_3S выделяется 670 кДж; белита C_2S – 353 кДж; целита I C_3A – 1090 кДж; целита II C_4AF – 570 кДж;

2) массивностью конструкции – тонкие конструкции способны рассеивать тепло, а массивные конструкции характеризуются повышением температуры до 50 °С и выше (эффект термоса), что может вызвать температурные напряжения и появление трещин.

Морозостойкость цементного камня определяется *минеральным* составом клинкера (содержания наименее морозостойкого целита I C_3A ограничивается до 5–8 %), снижением *водопотребности* цемента (тонкость помола цемента должна быть в пределах от 3000 до 4000 см²/г), уменьшением количества *воды затворения* в цементном тесте (значение B/C должно быть не более 0,4–0,55).

Хранение портландцемента осуществляют в закрытых складах отдельно по видам и маркам.

Транспортирование портландцемента осуществляют в специальных железнодорожных и автомобильных цементовозах или в упакованном виде в мешках в условиях, *исключающих* проникновение влаги.

Коррозия цементного камня – это *разрушение* цементного камня под воздействием агрессивных факторов среды эксплуатации. Коррозия цементного камня вызывается воздействием *агрессивных газов и жидкостей* на составляющие его минералы, главным образом на гидроксид кальция $Ca(OH)_2$ и гидроалюминат кальция $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$.

Коррозия первого вида (коррозия выщелачивания) – это разрушение цементного камня в результате растворения и вымывания свободной извести – *гидроксида кальция* $Ca(OH)_2$, образовавшегося в результате реакции гидратации *алита*

Коррозия второго вида (кислотная коррозия) это разрушение цементного камня в результате взаимодействия свободного *гидроксида кальция* $Ca(OH)_2$ с агрессивными веществами среды эксплуатации.

Коррозия третьего вида (сульфоалюминатная коррозия) – процесс разрушения цементного камня из-за образования соединений, имеющих *большой объем*, чем *суммарный объем* исходных продуктов реакции.

Коррозия четвертого вида (щелочная коррозия) происходит под действием растворов сильных щелочей – *натриевой щелочи NaOH* и *калиевой щелочи KOH*.

Контрольные вопросы

1. Воздушные вяжущие вещества. Основные виды, свойства, применение?
2. Низкообжиговый. Сырье, получение, свойства, применение?
3. Стандартные испытания строительного гипса?
4. Воздушная известь. Сырье, получение, свойства, условия применения?
5. Гашение воздушной извести. Продукты гашения. Условия получения. Использование в строительстве?
6. Магнезиальные вяжущие вещества. Сырье, схема получения. Реакции твердения. Свойства. Применение?
7. Гидравлические вяжущие вещества. Основные виды. Свойства. Применение?
8. Гидравлическая известь. Сырье, схема получения, свойства, условия применения?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Курс «Строительные материалы» является базисным для дисциплин программы подготовки «Строительство уникальных зданий и сооружений» – материаловедение, железобетонные, каменные и металлические конструкции, конструкции из дерева и пластмасс.

Порядок изложения материала в данном учебном пособии постепенно подводит к рассмотрению свойств строительных материалов от макроуровня до микро- и нано-уровня.

Материал позволяет адекватно оценить состояние технической проблемы, объяснить некоторые эффекты в зависимости от строения материала и обосновать правильность технических решений.

В основу доказательной базы основных положений по прогнозированию работы материалов при эксплуатации положены объяснение свойств с позиций физико-химической механики материалов и математические выводы расчетных формул.

Качество объектов строительного комплекса Кубани в значительной мере зависит от правильного выбора применяемых материалов.

Знание свойств и особенностей строительных материалов дает возможность инженеру выбирать их с учетом эксплуатационной среды, обоснованно заменять один материал на другой без ухудшения качества строительного объекта и принимать достаточные меры по защите материалов от коррозии.

Всеми этими навыками должны владеть выпускники Кубанского ГАУ специальности «Строительство уникальных зданий и сооружений», которые, применяя их на практике, будут обеспечивать динамическое развитие строительного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев В. А. Технология полимеров / В. А. Воробьев, Р. А. Андрианов. – М. : Высш. шк., 1971.
2. Горлов Ю. П. Технология теплоизоляционных материалов / Ю. П. Горлов, А. П. Меркин, А. А. Устенко. – М. : Стройиздат, 1980.
3. Горчаков Г. И. Строительные материалы / Г. И. Горчаков, Ю. М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1986.
4. Горяйнов К. Э. Технология изготовления минеральной ваты и изделия из нее / К. Э. Горяйнов. – М. : Госстройиздат, 1958.
5. Домокеев А. Г. Строительные материалы / А. Г. Домокеев. – М. : Высшая школа, 1989.
6. Китайцев В. А. Технология изготовления теплоизоляционных материалов / В. А. Китайцев. – М. : Стройиздат, 1964.
7. Микульский В. Г. Строительные материалы / В. Г. Микульский, Г. И. Горчаков. – М. : АСВ, 1996.
8. Петров Г. С. Термореактивные смолы и пластические массы / Г. С. Петров, А. М. Левин. – М. : Госхимиздат, 1959.
9. Попов К. Н. Строительные материалы и изделия / К. Н. Попов. – М. : Высшая школа, 2002.
10. Хигерович М. И. Строительные материалы / М. И. Хигерович. – М. : Стройиздат, 1970.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 КЛАССИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УНИФИКАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	4
2 СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	10
2.1 Строение и состав материала.....	10
2.2 Физические свойства.....	13
2.3 Гидрофизические свойства.....	18
2.4 Теплофизические свойства.....	26
2.5 Механические свойства.....	30
2.6 Физико-химические и технологические свойства....	42
2.7 Особые свойства.....	45
3 ПРИРОДНЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	47
4 НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА.....	52
4.1 Гипсовые вяжущее.....	53
4.2 Воздушная известь.....	60
4.3 Магнезиальное вяжущее.....	65
4.4 Растворимое стекло.....	66
4.5 Гидравлическая известь. Романцемент.....	68
4.6 Портландцемент.....	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	83
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	84

Учебное издание

Широкородюк Владимир Королькович

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебное пособие

В авторской редакции

Подписано в печать 15.07.2020. Формат 60 × 84 ¹/₁₆.

Усл. печ. л. – 5,0. Уч.-изд. л. – 3,9.

Тираж 50 экз. Заказ №

Типография Кубанского государственного
аграрного университета.

350044, Краснодар, ул. Калинина, 13

4.6.2 Разнои **ртландцемента**

Для более полного удовлетворения специфических требований отдельных видов строительства промышленность выпускает *особые виды* портландцемента.

При получении портландцементов с заданными специальными свойствами используют следующие основные технологические приемы:

1) регулирование *минерального состава и структуры* цементного клинкера, оказывающих значительное влияние на потребительские свойства портландцемента;

2) регулирование *тонкости помола и зернового состава* портландцемента, влияющих на скорость твердения, прочность, тепловыделение и другие важнейшие свойства вяжущего;

3) изменение качесивенного состава портландцемента введением в него *активных минеральных и органических добавок*, позволяющих целенаправленно изменять свойства вяжущего и снижать расход цемента.

Технология портландцемента позволяет изменять свойства готового продукта путем изменения *химического состава сырья*, изменением *тонкости помола*, введением различных *функциональных добавок* при помоле.

Глиноземистый цемент – гидравлическое вяжущее, обеспечивающее получение цементного камня высокой *прочности* в очень *короткие сроки* (1–3 сут). Этот цемент иногда называют

алюминатным, так как в его составе преобладают низкоосновные *алюминаты кальция* (80–85%).

Сырьем для производства глиноземистого цемента служит смесь пород с высоким содержанием *глинозема*, чаще *бокситов* $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ и *известняков* или *извести*, а также и более дешевое сырье – *алюминиевые шлаки* и материалы, получаемые обжигом высокоглиноземистых глин.

Глиноземистый цемент изготавливают *плавлением сырьевой смеси* в электрических печах, вагранках, конверторах при температуре выше 1500 °С. Реже применяют обжиг до спекания при температуре около 1300 °С во вращающихся печах или на агломерационной ленте.

Основным минералом глиноземистого цемента, как по количественному содержанию, так и по вяжущим свойствам, является *трехкальцевый алюминат* C_3A . В сравнительно небольших количествах в нем содержатся другие *низкоосновные алюминаты кальция* $5CaO \cdot 3Al_2O_3$ и $CaO \cdot 2Al_2O_3$. Силикаты кальция обычно представлены небольшим количеством *белита* C_2S .

Глиноземистый цемент образует цементный камень *высокой плотности*,

Глиноземистый цемент приобретает и длительно сохраняет высокую прочность только в том случае, если он *твердеет* при умеренных температурах. Если же температура превысит 25–30 °С, то происходит перекристаллизация *двухкальцевого гидроалюмината* C_2AH_8 в *трехкальцевый гидроалюминат* C_3AH_6 , сопровождающаяся уменьшением объема новообразований примерно на 25–30 % и возникновением *напряжений* в цементном камне, влекущих снижение прочности в 2–3 раза.

При затворении глиноземистого цемента высоких марок водой за счет *высокой экзотермии* выделяется примерно до 376 кДж/кг тепла в первые часы схватывания и твердения цемент-

ного теста. Это свойство глиноземистого цемента, с одной стороны, *ограничивает использование* его для бетонирования массивных конструкций, с другой – может оказать *положительное влияние* на производство бетонных работ в зимнее время.

При твердении глиноземистого цемента основное соединение клинкера – целит I $C_3A \cdot CaO \cdot Al_2O_3$, подвергается гидратации, в результате чего образуется *двухкальциевый гидроалюминат* C_2AH_8 :



При взаимодействии глиноземистого цемента с водой *не образуется свободная щелочь* $Ca(OH)_2$, благодаря чему бетоны и растворы на глиноземистом цементе значительно лучше противостоят коррозирующему действию *минерализованных вод* и имеют повышенную *стойкость* к сульфатной коррозии.

Однако бетоны на глиноземистом цементе *коррозируют* в кислых агрессивных средах, концентрированных растворах сернокислого магния, в щелочных средах при концентрации щелочей более 1 %. С *повышением температуры* твердения глиноземистого цемента сверх 25–30 °С прочность цементного камня *понижается*, вследствие перекристаллизации *двухкальциевого гидроалюмината* C_2AH_8 в *трехкальциевый* C_3AH_6 . Поэтому пропаривание и автоклавную обработку изделий на глиноземистом цементе не производят.

Глиноземистый цемент используют в случае необходимости *повышенной коррозионной стойкости* бетонных сооружений и *быстрого ввода* их в эксплуатацию. Кроме того, его применяют при аварийно монтажных и ремонтных работах, для *тампонирования* нефтяных скважин, а также для получения *жаростойкого бетона* и для производства бетонных работ в зимнее время.

Расширяющиеся и безусадочные цементы

Твердение всех гидравлических вяжущих веществ в воздушной среде сопровождается *уменьшением объема цементного камня* (усадкой). Усадочные деформации могут привести к образованию трещин в бетонах, что нарушает монолитность конструкций и снижает их долговечность. Для расширяющихся и безусадочных цементов характерно равномерное приращение объема цементного камня в начальный период твердения, что *компенсирует* усадочные явления. Линейное расширение у расширяющихся цементов обычно составляет 0,3–1 %, у безусадочных – 0,01–0,1 %.

Многочисленные виды расширяющихся цементов представляют собой *смешанные цементы*, состоящие из основного вяжущего вещества (глиноземистый портландцемент) и компонентов, обеспечивающих увеличение объема цементного камня в начальный период твердения (в большинстве случаев гипс, высокоосновные гидроалюминаты кальция, глиноземистые шлаки).

В процессе твердения расширяющихся цементов образуется *этtringит* $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot (31-32)\text{H}_2\text{O}$, который обеспечивает эффект расширения.

Водонепроницаемый расширяющийся цемент ВРЦ получают *смешиванием* или совместным помолом *глиноземистого цемента* (70 %), *полуводного гипса* (20 %) и молотого специально изготовленного *высокоосновного гидроалюмината кальция* $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ (10 %).

Водонепроницаемый безусадочный цемент ВВЦ состоит из тех же компонентов, что и ВРЦ, но взятых в *других соотношениях*. Эти цементы *быстро схватываются* (начало схватывания – несколько минут, конец – не позднее 5–10 мин) и *быстро твердеют*, достигая к 3 сут 60–80% марочной прочности. Они образуют цементный камень высокой *водонепроницаемости* (выдерживает давление воды до 0,7 МПа), за что и получили второе название «*водонепроницаемых*» цементов.

Водонепроницаемые расширяющиеся и безусадочные цементы *применяют* для заделки и гидроизоляции швов тюбингов, раструбных труб, стыков и трещин в бетонных и железобетонных конструкциях, подливок под машины и фундаментных болтов и т. п.

Нельзя применять эти цементы в конструкциях, эксплуатируемых в среде с недостаточной влажностью или при температуре более 80 °С.

Расширяющийся портландцемент РПЦ получают из цементного клинкера – 58–63 %, высокоглиноземистого доменного шлака – 5–7 %, двуводного гипса – 7–10 % и активной минеральной добавки – 20–25 %, которые совместно размалывают в тонкий порошок.

Расширяющийся портландцемент характеризуется более быстрым нарастанием прочности, чем портландцемент, особенно при кратковременном пропаривании изделий, высокой плотностью и водонепроницаемостью цементного камня до 1,2 МПа и более.

Применяют **расширяющийся портландцемент** там же, где и другие расширяющиеся цементы, а также в производстве сборных железобетонных изделий, что позволяет сократить время тепловой обработки до 4–6 ч.

Напрягающий портландцемент изготавливают на основе клинкеров портландцемента (65–70 %) и глиноземистого цемента (16–20 %) с добавлением двуводного гипса (14–16 %) путем совместного помола до удельной поверхности не менее 3500 см²/г.

Напрягающий портландцемент быстро схватывается (через 2–7 мин) и быстро твердеет, приобретая через сутки нормального твердения прочность до 20 МПа.

Характерной особенностью этого цемента являются не только значительная величина, но и большая энергия *расширения*, обеспечивающие *самонапряжение* камня до 3–4 МПа. Это

свойство *НЦ* позволяет использовать его для изготовления самонапряженных железобетонных конструкций, в которых *натяжение арматуры* возникает при расширении твердеющего камня.

При этом арматура может получить двух- и трехосное напряжение, чего трудно добиться обычными приемами натяжения арматуры.

Напрягающий цемент рекомендуется применять для изготовления напорных труб и других тонкостенных железобетонных изделий и конструкций с напряженной арматурой.

Быстротвердеющий портландцемент *БТЦ* отличается более интенсивным набором прочности в 3-х суточном возрасте (более 50 % его марочной прочности).

Это обеспечивается следующими технологическими приемами:

1) повышенным содержанием в клинкере активных минералов: суммарное содержание *алита* C_3S и *целита* I C_3A составляет не менее 60–65 %;

2) более тонким помолом цемента: *удельная поверхность* составляет 3500–4000 $см^2/г$ вместо 2800–3000 $см^2/г$ как у обычного портландцемента.

Особо быстротвердеющий цемент *ОБТЦ* характеризуется увеличением содержания *алита* C_3S до 65–68% при содержании *целита* I C_3A не более 8 %. Помол клинкера ведется до удельной поверхности 4000–4500 $см^2/г$ и более. Через 1 сут *ОБТЦ* имеет не менее 50% марочной прочности (20–25 МПа), а через 3 сут – 80–100 % марочной прочности (40 МПа).

Сверхбыстротвердеющий цемент *СБТЦ* имеет специальный состав, который обеспечивает нарастание прочности уже в первые сутки твердения, то есть через 1–3 ч дает раннюю прочность, через 6 ч прочность составляет 20–25 % марочной прочности.

Быстротвердеющие портландцементы *рекомендуется применять* при массовом производстве сборных железобетонных

изделий, а также при зимних бетонных работах. Их применение дает возможность сократить расход цемента, длительность тепло-влажностной обработки или даже отказаться от нее, тем самым увеличить оборот форм и сэкономить металл. *Нельзя применять* такие цементы для бетонов массивных конструкций и подвергающихся сульфатоалюминатной коррозии.

Сульфатостойкий портландцемент СПЦ

Основными свойствами сульфатостойкого портландцемента являются высокая стойкость к сульфатной коррозии, пониженная экзотермия при твердении и повышенная морозостойкость. Это обеспечивается тем, что клинкер содержит минимальное количество следующих минералов: не более 50% *алита* C_3S , не выше 5 % *целита I* C_3A и не более 22 % суммарного содержания *целита I* C_3A и *целита II* C_4AF .

Применяют СПЦ в условиях действия сульфатных вод, попеременного замораживания и оттаивания, высыхания и увлажнения в пресной или слабоминерализованной воде.

Цветные портландцементы

Получение цветного портландцемента обеспечивается следующими двумя технологическими приемами:

1) *совместным помолом* белого клинкера и свето- и щелочестойких пигментов;

2) введением в состав сырьевой смеси *пигментов* – до 1 % оксидов металлов для придания цветовой окраски (оксид кобальта CoO – коричневый цвет, оксид хрома Cr_2O – желто-зеленый цвет, оксид марганца MnO – голубой цвет).

Белый портландцемент

Технология белого цемента базируется на получении *белого клинкера*, для чего берется карбонатное и глинистое сырье с уменьшенным содержанием до 0,5 % *оксидов железа* Fe_2O_3 и до 0,15 % *оксида марганца* MnO .

ПОРТЛАНДЦЕМЕНТЫ С ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫМИ ОРГАНИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

Портландцементы с органическими поверхностно-активными добавками получают добавлением *поверхностно-активных веществ ПАВ* в количестве 0,1–0,3 % при помоле клинкера.

Пластифицированный портландцемент получают введением при помоле клинкера 0,15–0,25 % *гидрофильно-пластифицирующих* добавок (например, *ЛСТ* – лигносульфонаты технические).

Адсорбируясь на поверхности зерен цемента, добавка улучшает их *смачивание* водой. Образующиеся адсорбционно-гидратные слои воды обеспечивают *гидродинамическую смазку*, уменьшая трение между частицами портландцемента.

Пластификация портландцемента обеспечивает *снижение водопотребности* портландцемента, *увеличение пластичности* цементного теста, повышение *устойчивости к расслоению*, что обеспечивает плотность, водонепроницаемость, морозостойкость цементного камня.

Применяют пластифицированный портландцемент в дорожном, гидротехническом, аэродромном строительстве.

Гидрофобный портландцемент получают путем введения при помоле клинкера 0,1–0,3 % *гидрофобизирующих* поверхностно-активных веществ (мылонафт, асидол и т. д.).

Молекулы гидрофобизирующих веществ имеют *ассиметрично-полярное строение* и состоят из полярной группы и неполярной – углеводородного радикала. Эти молекулы, адсорбируясь на поверхности цементных зерен, *ориентируются углеводородным радикалом* наружу, придавая цементу водоотталкивающие свойства.

Гидрофобный портландцемент характеризуется повышенной *стабильностью свойств* при длительном хранении, имеет

пониженную водопотребность, обеспечивает повышение пластичности и однородности цементного теста.

Гидрофобный портландцемент способствует гидрофобизации цементного камня, располагаясь на поверхности пор и капилляров, и обеспечивает уменьшение водопоглощения и капиллярного подсоса строительных конструкций. Применяется гидрофобный цемент для гидротехнического, дорожного и аэродромного строительства, а также в условиях необходимости длительного транспортирования или хранения.

ПОРТЛАНДЦЕМЕНТЫ С АКТИВНЫМИ МИНЕРАЛЬНЫМИ (ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ) ДОБАВКАМИ

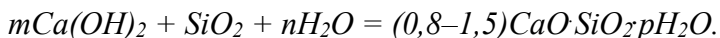
Классификация активных минеральных добавок:

1) **природные** гидравлические добавки (доломит, трепел, опока);

2) **искусственные** гидравлические добавки (доменные шлаки, топливные золы).

Механизм действия активных гидравлических добавок заключается в том, что в их состав входят *химически активные составляющие* – аморфный диоксид кремния SiO_2 и алюмосиликаты $Al_2O_3 \cdot SiO_2$.

При твердении портландцементов с активными минеральными (гидравлическими) добавками происходит *взаимодействие* растворимых продуктов гидратации – *гидроокиси кальция* $Ca(OH)_2$ и гидравлических добавок с образованием практически нерастворимых соединений в виде *гидросиликатов* кальция:



В зависимости от активной минеральной добавки и ее количества портландцементы с минеральными добавками разделены на три вида: *портландцемент с минеральными добавками ПЦД*, *пуццолановый портландцемент ППЦ* и *шлакопортландцемент ШПЦ*.

Портландцемент с минеральными добавками ПЦД получают совместным размолотом *клинкера*, минеральных *добавок* и *гипса*. Предельно допустимое содержание минеральных добавок в цементе *не должно* превышать 20 %. При этом практически сохраняются все свойства портландцемента, кроме морозостойкости (она несколько ниже), а некоторые свойства улучшаются (больше водостойкость, меньше тепловыделение, более высокая сопротивляемость коррозии первого вида).

Марки такого цемента те же, что и у портландцемента.

Применяют в строительстве *наряду* с портландцементом за *исключением* случаев, когда требуется высокая морозостойкость.

Портландцемент с минеральными добавками имеет разновидности: *быстротвердеющий портландцемент ПЦД-Б* и *сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками – СПЦД* (ГОСТ 22266). Для получения указанных цементов используют *клинкер*, состав которого аналогичен клинкеру соответственно быстротвердеющего и сульфатостойкого портландцемента, и *минеральные добавки* – гранулированный шлак (не более 10–20 %) или трепел, опоку, диатомит (не более 5–10 %). Такие цементы выпускают М400 и 500 и применяют практически наравне с быстротвердеющим и сульфатостойким портландцементом.

Пуццолановый портландцемент изготовляют путем совместного тонкого помола *клинкера*, содержащего не более 8 % *алита* C_3A , необходимого количества *гипса* и активной минеральной *добавки* 20–40 %, или тщательным смешиванием тех же материалов, измельченных отдельно. Содержание активных минеральных добавок устанавливают с учетом активности минеральной добавки и минерального состава клинкера. Отличительной особенностью пуццоланового портландцемента является замедленное нарастание прочности в *началь-*

ные сроки твердения. Однако в дальнейшем прочность образцов с пуццолановым цементом достигает прочности образцов портландцементом этой же марки. При этом твердение пуццолановых портландцементов сопровождается *меньшей экзотермией*, что позволяет использовать эти цементы для бетонирования массивных сооружений.

Цементный камень пуццоланового портландцемента обладает большей водостойкостью, водонепроницаемостью и повышенной стойкостью к отдельным видам коррозии. Это происходит вследствие того, что *свободная известь* $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющаяся при твердении *алита* C_3S , химически связывается активной минеральной добавкой в *нерастворимое соединение*.

В тоже время бетоны на этом цементе *менее морозостойки*, чем бетоны на портландцементе, кроме того, они могут постепенно *терять прочность*, находясь в сухой воздушной среде. Пуццолановый портландцемент хорошо твердеет в воде и во влажных условиях.

Повышенные *водостойкость* и *водонепроницаемость*, а также умеренная *экзотермия* при твердении обуславливают целесообразность применения пуццоланового портландцемента для строительства *массивных гидротехнических сооружений*, а также для тоннелей, канализационных и водопроводных сетей, при кладке фундаментов и т. п.

Шлакопортландцемент ШПЦ изготавливают так же, как и пуццолановый портландцемент, но в качестве активной минеральной добавки используют *доменные гранулированные шлаки*, содержание которых должно быть не менее 21 % и не более 80 % от массы цемента.

Доменные шлаки представляют собой *продукт сплавления веществ*, находящихся в пустой породе руды и топлива в основном в виде глины с флюсами (плавнями), которыми обычно являются известняк и доломит. При выплавке 1 т чугуна в среднем получается 0,6–0,75 т шлака.

По химическому составу доменные шлаки в основном состоят из CaO , SiO_2 , Al_2O_3 и отчасти MgO , суммарное содержание которых достигает 90–95 %.

При высокой температуре в доменной печи оксид кремния SiO_2 и оксид алюминия Al_2O_3 глинистых минералов взаимодействуют с оксидом кальция CaO . При этом образуются малоосновные силикаты и алюминаты кальция.

При быстром охлаждении расплав не успевает закристаллизоваться и шлак образуется в *стекловидном аморфном состоянии*. В этом случае он имеет большую химическую активность.

Поэтому для изготовления вяжущих веществ используют шлаки, которые получают быстрым охлаждением расплава водой. Такие шлаки имеют вид зерен (гранул) размером до 10 мм, отсюда их название – **гранулированные**.

Качество доменных гранулированных шлаков характеризуют модулями *основности* M_O и *активности* M_A :

$$M_O = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}; \quad M_A = \frac{\%Al_2O_3}{\%SiO_2}. \quad (4.2)$$

Если модуль основности равен или больше единицы, шлак называют **основным**, при модуле меньше единицы – **кислым** шлаком.

Гидравлическая активность доменных шлаков в большинстве случаев с увеличением M_O и особенно M_A возрастает.

Если основные шлаки измельчить и смешать с водой, то они схватываются и затвердевают, т. е. обладают самостоятельными вяжущими свойствами, особенно в присутствии *активизаторов* (например, извести или гипса). Такие шлаки можно вводить в шлакопортландцемент до 50–80 %.

Кислые шлаки не обладают самостоятельными вяжущими свойствами, но при наличии гидроксида кальция $Ca(OH)_2$, выделяющегося при твердении клинкерной части шлакопортландцемента, твердеют, образуя низкоосновные гидросиликаты и

гидроалюминаты кальция. Во избежание значительного снижения морозостойкости и водонепроницаемости бетонов их дозировка должна быть умеренной – не более 40 %.

Шлакопортландцемент выпускают трех марок: 300, 400, 500. Он имеет две разновидности: *быстротвердеющий шлакопортландцемент – ШПЦБ М400* и *сульфатостойкий шлакопортландцемент – СШПЦ М300 и 400*.

4.7 Силикатные вяжущие

Силикатные (известково-кремнеземистые) вяжущие автоклавного твердения представляют собой смесь *воздушной извести* (6–8 %) и мелкодисперсного *кремнеземистого компонента* (92–94 %).

Состав для изготовления силикатного бетона: известково-кремнеземистое вяжущее, затворитель (вода); мелкий и крупный заполнители.

Технология приготовления известково-кремнеземистого вяжущего:

1) *помол* известково-кремнеземистой смеси (влияние тонкости помола и содержания кварцевого песка на прочность силикатного бетона приведено на рисунке 4.6);

2) *гашение извести* в смеси с песком в специальных силосах или гасильных барабанах;

3) *твердение* силикатобетонных изделий производят в автоклавах в среде насыщенного водяного пара при давлении 0,9–1,6 МПа и температуре 175–200 °С в течение 10–14 ч.

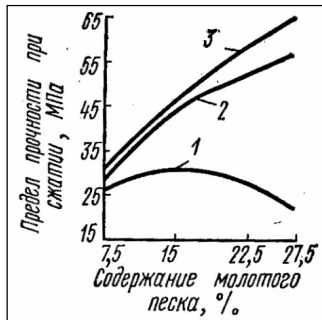


Рисунок 4.6 – Влияние тонкости помола и содержания кварцевого песка на прочность силикатного бетона

1, 2, 3 – удельная поверхность молотого песка соответственно равна 1500 см²/г; 2500 см²/г; 4500 см²/г (по Ю. А. Гершбергу)

Автоклав (рисунок 4.7) представляет собой горизонтально расположенный стальной цилиндр диаметром 2 м и более, длиной 20–30 м, с торцом, герметически закрытым крышкой.

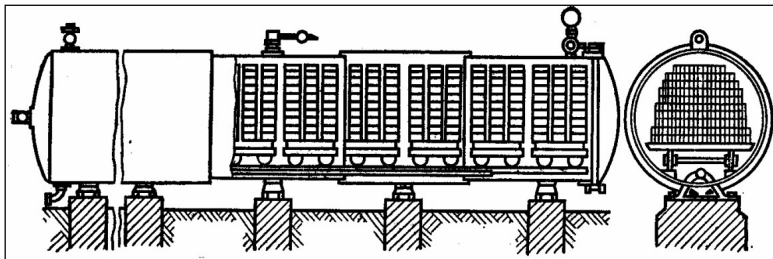
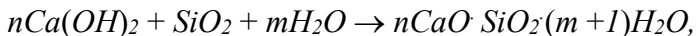


Рисунок 4.7 – Автоклав с изделиями

При автоклавной обработке происходит реакция между гидроксидом кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и оксидом кремнезема SiO_2 :



с образованием цементирующего вещества в виде гидросиликатов кальция $n\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (m+1)\text{H}_2\text{O}$ различного состава.

После выгрузки влажных изделий из автоклава в процессе их сушки происходит *нарастание* прочности изделий.

ВИДЫ СИЛИКАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Силикатный известково-песчаный кирпич имеет ту же форму и те же размеры, что и керамический.

Обычно силикатный кирпич имеет светло-серый цвет, но может быть и цветным, если в состав смеси ввести *щелочестойкие пигменты*.

Средняя плотность силикатного кирпича 1800–1900 кг/м³, а теплопроводность 0,82–0,87 Вт/(м·°С). В зависимости от предела прочности при сжатии и изгибе силикатный кирпич подразделяют на марки от 75 до 300. Морозостойкость должна быть не ниже *F15*, а водопоглощение по массе – 8–16 %.

Применение силикатного кирпича реализуется там же, где и керамического, за исключением конструкций, подвергающихся систематическому воздействию воды и высоких температур.

Ограничения в использовании силикатного кирпича:

1) в условиях систематического *увлажнения водой*, особенно содержащей агрессивные примеси солей или кислот, происходит разложение гидросиликатов кальция;

2) при длительном действии *температуры* выше 500 °С силикатный кирпич разрушается вследствие *дегидратации* гидросиликатов кальция, а также *полиморфного превращения* кварца в другую модификацию, что сопровождается скачкообразным увеличением объема его зерен;

3) использование силикатного кирпича в *условиях повышенной сейсмичности ограничивается* величиной его *нормального сцепления* в кладке, которая значительно меньше, чем у керамического кирпича, вследствие сравнительно не-большой открытой пористости.

5 ИСКУССТВЕННЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

5.1 Керамические материалы

Керамика – это искусственный материал, получаемый в результате *обжига глинистых пород* до получения *керамического черепка*. Важнейшее свойство *керамического черепка* – это его **водостойкость**, при этом *температура обжига* глинистых пород может быть различной.

Керамические материалы – это искусственные каменные материалы, изготавливаемые из глинистого минерального сырья путем формования и последующего обжига при высоких температурах.

СЫРЬЕ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

Сырьевую массу для изготовления керамических изделий составляют пластичные материалы (глины, каолины) и непластичные материалы (отошающие и выгорающие добавки, плавни и т. д.).

Глины – осадочные горные породы тонкоземлистого строения, способные при смешивании с водой образовывать *пластичное тесто*, переходящее после обжига в водостойкий и прочный *керамический камень*. Основные свойства глин приведены в таблице 5.1.

Химический состав глин – *водные алюмосиликаты* $Al_2O_3 \cdot nSiO_2 \cdot mH_2O$.

Минеральный состав глин:

а) глинообразующие минералы:

каолинит $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, глина имеет название **каолин**, после обжига имеет белый цвет; *галлуазит* $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$; *монтморрилонит* $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$, глина имеет название **бентонит**; гидрослюда;

б) примеси: кварц SiO_2 ; полевой шпат; органические примеси; оксиды железа Fe_2O_3 и равномерно распределенный углекислый кальций $CaCO_3$ понижают огнеупорность глин;

крупные зерна углекислого кальция $CaCO_3$ относятся к вредным примесям, так как при обжиге образуют включения негашеной извести CaO , которые во влажной среде гидратируют в гашеную известь $Ca(OH)_2$ с увеличением объема.

КЕРАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЛИН

Пластичность – способность глиняного теста *деформироваться* под влиянием внешних механических воздействий *без нарушения сплошности* (без разрыва или образования трещин) и сохранять полученную форму после прекращения этих воздействий.

Характеризуется **числом пластичности**:

$$П_{\text{л}} = W_T - W_P, \quad (5.1)$$

где W_T и W_P – значения влажности, соответствующие пределу текучести и пределу раскатывания.

Схема расклинивающего действия воды на свойства глин показана на рисунке 5.1 и изменение деформативных свойств глины от ее влажности приведена на 5.2.

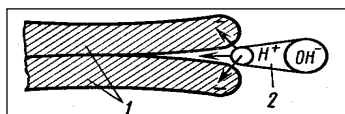


Рисунок 5.1 – Схема расклинивающего действия адсорбируемой воды (по М. И. Роговому)

1 – слипшиеся глинистые частицы с отрицательными зарядами на концах; 2 – дипольная молекула воды

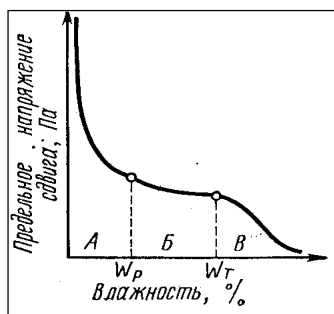


Рисунок 5.2 – Изменение деформативных свойств глины от ее влажности (по М. И. Роговому):

A – область хрупкого состояния; *B* – область пластического состояния;
B – область вязкотекучего состояния

Таблица 5.1 – Основные свойства глин

Вид глины	Количество глинистого вещества, %	Водопотребность, %	Воздушная усадка, %	Огневая усадка, %
Высокопластичные $Пл > 25$	80–90	более 28	10–15	2–6
Среднепластичные $Пл - (15-25)$	30–60	20–28	7–10	2–6
Малопластичные $Пл - (7-15)$	5–30	менее 20	5–7	2–6

Связность – усилие, необходимое для разъединения частиц глины.

Связующая способность глины выражается в том, что глина может связывать частицы непластичных материалов (песка, шамота и др.) и образовывать при высыхании достаточно прочное изделие – **сырец**.

Огневая усадка глин – изменение размеров и объема при обжиге изделия.

Огнеупорность – свойство глин выдерживать действие высокой температуры без деформации:

глины *высшей огнеупорности* (более 2000 °С);

глины *огнеупорные* (более 1580 °С);

глины *тугоплавкие* (1350–1580 °С);

глины *легкоплавкие* (ниже 1350 °С).

ДОБАВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИКИ

Отощающие добавки (шамот, шлак, зола) добавляют в глину для уменьшения усадки.

Порообразующие добавки (мел, молотый доломит, древесные опилки, торфяная пыль) добавляют для повышения пористости.

Плавни (полевые шпаты, железная руда, доломит) добавляют для понижения температуры плавления.

Цветные добавки (оксиды железа, кобальта, хрома) добавляют для получения цветной керамики.

КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ

Глазурь – стекловидный слой, который наносится на поверхность готовой керамики и закрепляется *дополнительным обжигом*.

Ангоб – тонкий слой белой или цветной глины, который наносится на поверхность не обожженного глинистого изделия и закрепляется *совместным обжигом*.

Керамические покрытия служат для защиты основного материала от вредных воздействий среды эксплуатации и улучшения внешнего вида.

ТЕХНОЛОГИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В общем случае производство керамических строительных материалов включает в себя следующие основные технологические операции:

1) *подготовка* сырьевых материалов;

2) *перемешивание* глинистого состава до однородной (гомогенной) массы;

3) *формование* изделий, которое в зависимости от влажности формовочной массы W_m осуществляется следующими способами:

способ *пластического формования*, $W_m - 15-25 \%$, который осуществляется на формовочном оборудовании, приведенном на рисунке 5.3;

способ *полусухого формования*, $W_m - 8-12 \%$;

способ *сухого прессования*, $W_m - 2-8 \%$;

способ *иликерного литья*, $W_m - 40 \%$;

4) *сушка* изделий до влажности формовочной массы $W_m - 6-8 \%$;

5) *обжиг* изделий; *структура* керамического черепка контролируется величиной его водопоглощения по массе;

при обжиге протекают следующие процессы:

110 °С – удаление свободной воды;

500–600 °С – выгорание органических примесей и удаление химически связанной воды;

600–1100 °С – декарбонизация (разложение карбонатных соединений);

1100–1300 °С – образование керамики (легкоплавкие соединения заполняют поры между не расплавившимися более тугоплавкими частицами); при обжиге возможны следующие негативные результаты: *недожог* – материал имеет низкую прочность и малую влагостойкость; *пережог* – материал имеет высокую плотность и искаженную форму;

6) *охлаждение и складирование* изделий.

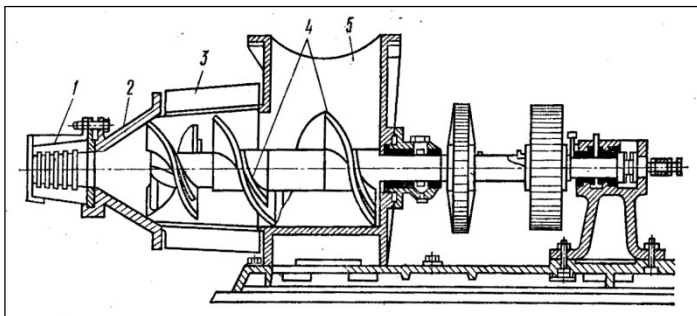


Рисунок 5.3 – Схема ленточного пресса для
пластического формования

1 – мундштук; 2 – головка пресса; 3 – цилиндр пресса;
4 – лопасти шнека; 5 – воронка

СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Плотность: истинная – $2,7 \text{ г/см}^3$; средняя – $0,2\text{--}2,5 \text{ г/см}^3$.

Коэффициент теплопроводности:

плотного черепка – $1,16 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$;

пористого черепка – $0,07 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$.

Коэффициент теплоемкости $0,18\text{--}0,22 \text{ ккал/кг}^\circ\text{С}$.

Коэффициент термического расширения $0,00014 \text{ }^\circ\text{С}^{-1}$.

Предел прочности при сжатии – от $0,05$ до 1000 МПа .

Морозостойкость – марки керамики по морозостойкости от *F15* до *F100*.

Водопоглощение по массе – от 0 до 70% ; зависимость водопоглощения по массе от температуры обжига керамического материала приведена на рисунке 5.4.

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

По степени эффективности (средней плотности) кирпич бывает:

обыкновенный – средняя плотность не менее 1600 кг/м^3 ;

условно-эффективный – средняя плотность керамического кирпича 400–1600 кг/м³;

эффективный – средняя плотность не более 1400 кг/м³.

По *структуре* кирпич подразделяют на **полнотелый** и **пустотелый**.

По *условия применения* кирпич подразделяют на **лицевой** и **рядовой**.

Линейные размеры кирпича: **обычный** – 250×120×65 мм; **укрупненный** – 250×120×88 мм.

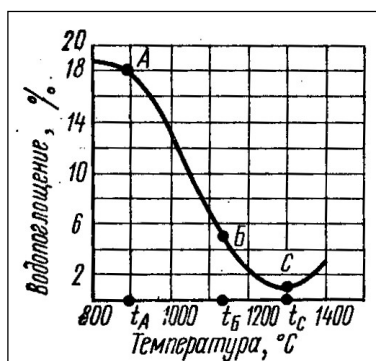


Рисунок 5.4 – зависимость водопоглощения по массе от температуры обжига керамического материала (по М. И. Роговому)

A – область хрупкого состояния; *B* – область пластического состояния; *C* – область вязкотекучего состояния; t_A ; t_B ; t_C – соответствующие температуры перехода из одного состояния в другое

Масса кирпича должна быть *не более* 4 кг (для обеспечения нормальных условий ручного труда).

Водопоглощение кирпича по массе должно быть *не менее* 8 % (для обеспечения достаточной площади *адгезионного взаимодействия* с кладочным раствором за счет сформированной

открытой пористости). Это свойство имеет определяющее значение при испытании на *нормальное сцепление* для применения в районах повышенной сейсмичности.

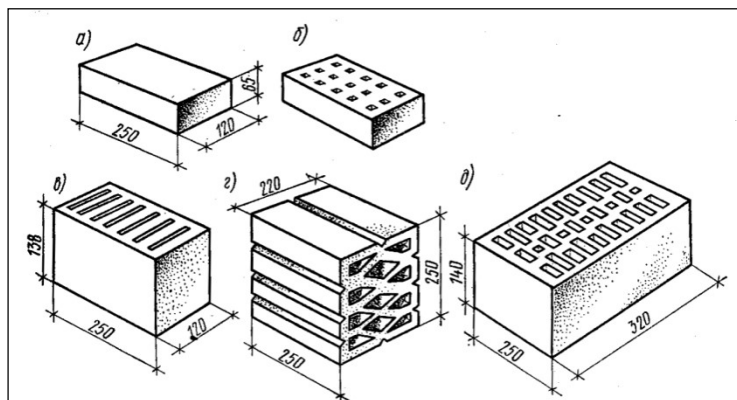


Рисунок 5.5 – Виды керамических стеновых изделий:

а – обыкновенный кирпич; б – дырчатый кирпич; в – щелевой камень;
г – сотовый камень; д – щелевой камень для панелей

КЛАССИФИКАЦИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

По *назначению*:

стенные, отделочные, кровельные, для устройства полов, санитарно-технические, теплоизоляционные, огнеупорные, заполнители для бетонов.

По *структуре*:

1) изделия с *пористым* черепком (водопоглощение по массе W_m более 5 %) – кирпич, дренажные трубы;

2) изделия со *спекшимся* (плотным) черепком (водопоглощение W_m меньше 5 %); характеризуются полной водонепроницаемостью – плитки для полов, фарфоровые изделия.

ВИДЫ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Стеновые материалы – кирпич керамический рядовой и лицевой; кирпич пустотелый; кирпич пористо-пустотелый, крупноразмерные блоки и панели из кирпича и керамических камней.

Фасадные облицовочные изделия – кирпич лицевой, ковровая керамика, малогабаритные плитки; фасонные изделия.

Кровельные материалы – керамическая черепица.

Теплоизоляционные материалы – керамзит.

Кислотоупорные материалы – молотая керамика (шамот) со связующим на основе жидкого стекла.

Огнеупорные материалы – огнеупорные штучные материалы, кладочные растворы и обмазки.

Глазурированные плитки для внутренней облицовки стен помещений с повышенной влажностью (при обжиге плитки получают пористыми, после чего лицевая поверхность покрывается глазурью).

Плитки для полов – метлахские плитки, керамогранит (практически водонепроницаемы, мало истираемы).

Дренажные трубы формируют из высокопластичных глин (неглазурированные, глазурированные, перфорированные), применяют при мелиоративных работах).

Канализационные трубы (поверхность внутри и снаружи покрыта кислотоупорной глазурью) используют для отвода сточных вод.

Керамика для санитарно-технических и декоративных изделий включает в себя следующие виды:

фаянс ($W_t - 10-12 \%$, $R_{сж}$ до 100 МПа);

полуфарфор ($W_t - 3-5 \%$, $R_{сж}$ до 150–200 МПа);

фарфор ($W_t - 0,2-0,5 \%$, $R_{сж}$ до 500 МПа).

5.2 Стекло и ситаллы

СТЕКЛО

Стеклом называют твердый аморфный материал, получаемый при переохлаждении минеральных расплавов.

Характерные свойства стекла:

отсутствие четко выраженной точки плавления;
обратимость перехода из твердого в жидкое состояние;
гомогенность (однородность);
изотропность – независимость свойств от направления.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СТЕКЛА

Стекло не имеет определенного химического состава, выражаемого химической формулой, поэтому состав стекла условно выражают суммой окислов.

Основные сырьевые материалы:

кремнезем SiO_2 – основной стеклообразующий оксид (64–73,4 %); вводится в шихту в виде кварцевого песка с минимальным содержанием окрашивающих примесей (железа, хрома, титана);

глинозем Al_2O_3 – повышает тугоплавкость и химическую стойкость стекла;

оксиды натрия Na_2O и **калия** K_2O – плавни, понижающие температуру плавления;

оксиды кальция CaO и **магния** MgO – повышают химическую стойкость стекла, вводятся в виде мела, мрамора, известняка, доломита;

специальные добавки – оксид бария BaO – для получения *оптического* стекла); оксиды свинца PbO и цинка ZnO – для производства *лабораторного* стекла.

Вспомогательные сырьевые материалы:

осветлители – сульфат натрия N_2SO_4 и аммония $(NH_4)_2SO_4$ – для удаления газовых пузырьков из стекломассы;

глушители – соединения фтора и фосфора – делают стекло непрозрачным;

красители – соединения кобальта (синий цвет), хрома (зеленый цвет), марганца (фиолетовый цвет) – для придания стеклу цветового эффекта.

ТЕХНОЛОГИЯ СТЕКЛА

В общем случае производство стекла включает следующие технологические операции:

- 1) подготовка сырьевых материалов;
- 2) дозирование компонентов стекольной шихты;
- 3) варка стекломассы при температуре 1100–1600 °С;
- 4) формование изделий (вертикальное вытягивание; формование на поверхности расплавленного металла; выдувание); установка для вытяжки листового стекла приведена на рисунке 5.6.
- 5) термическая обработка (отжиг, закалка);
- 6) механическая или химическая обработка изделий (шлифование, полирование, декоративная обработка).

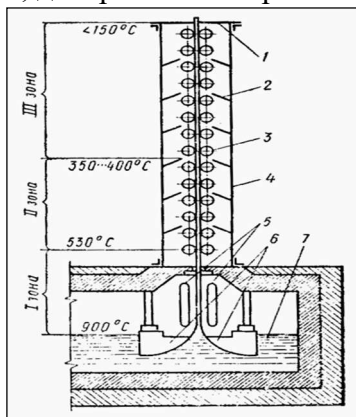


Рисунок 5.6 – Установка для вытяжки листового стекла.

Свойства стекла:

прочность при растяжении: теоретическая 12000 МПа; практическая 30–60 МПа из-за микро неоднородностей, трещин, внутренних напряжений;

прочность в диапазоне температур от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ практически не меняется;

хрупкость – главный недостаток стекла из-за высокой скорости распространения трещин и отсутствия препятствий;

оптические свойства:

светопропускание, или прозрачность; обычные силикатные стекла *пропускают* всю видимую часть спектра, но *не пропускают* ультрафиолетовые и инфракрасные лучи;

светопреломление – определяет силу отраженного света и светопропускание стекла при разных углах падения света; *показатель преломления* $-1,5-1,52$; при изменении угла от 0 до 75° светопропускание уменьшается с 92 до 50% , остальное составляет отражение или рассеивание света;

теплопроводность – $0,5-1,0\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$;

коэффициент линейного температурного расширения – около $9,6\cdot 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;

термостойкость – стекло имеет малую термостойкость, что приводит к его растрескиванию из-за *высоких напряжений при термических деформациях* вследствие высокого модуля упругости и низкой теплопроводности;

звукоизолирующая способность – стекло толщиной 1 см соответствует кирпичной стене в $1/2$ кирпича – 12 см ;

химическая стойкость – стекло разрушается только при действии *горячих щелочей, плавиковой и фосфорной кислот*.

ВИДЫ СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Оконное стекло – листовое стекло толщиной от 2 до 6 мм .

Увиолевое стекло – пропускает 25–75 % ультрафиолетовых лучей, используют для остекления лечебных и детских учреждений.

Теплозащитное стекло – поглощает до 75 % инфракрасных лучей, применяется для остекления зданий и транспортных средств в южных районах.

Многослойное стекло (**триплекс**) – специальное стекло, которое при ударе не дает осколков и состоит из нескольких слоев стекла, склеенных между собой прозрачной эластичной полимерной (поливинилбутирольной) прокладкой.

Закаленное стекло – характеризуется небольшим внутренним растяжением всей толщи стекла и сильно сжатыми поверхностными слоями. При раскалывании оно распадается на мелкие кусочки с не режущими кромками.

По сравнению с обычным стеклом ударная прочность закаленного стекла больше в 4–6 раз, а прочность при изгибе – в 5–8 раз.

Армированное стекло – стекло с запрессованной в стекломассу металлической сеткой.

Цветное стекло используют в декоративных целях, в том числе для создания ковровой мозаики; **смальта** – кусочки стекла неправильной формы.

Зеркальное стекло – полированное стекло с нанесением на него с одной стороны тонкого слоя алюминия или серебра, защищенного от влаги эмалью.

Стеклоблоки – пустотелые изделия квадратной формы размерами 294×294×98 мм; средняя плотность 800 кг/м³, теплопроводность 0,46 Вт/(м·°С).

Стекланные трубы и другие профильные изделия, получаемые непрерывной вытяжкой.

МАТЕРИАЛЫ ИЗ РАСПЛАВЛЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ИЛИ ШЛАКОВ

Литые каменные изделия – материал, получаемый из расплавленных горных пород или шлаков литьем в формы с последующей термообработкой.

Сырье – горные породы или металлургические шлаки.

Технология включает следующие операции: подготовка шихты (дробление, помол, дозирование, перемешивание); плавление при 1400–1500 °С; охлаждение до 1300 °С; отжиг – медленное охлаждение для снятия внутренних напряжений.

Свойства: прочность – при сжатии 400 МПа, при изгибе – до 65 МПа; малая истираемость (в 3–5 раз меньше, чем у гранита); высокая химическая стойкость.

Минеральная вата – волокнистый материал, получаемый из расплавов горных пород или огненно-жидких шлаков. Стекло- и минеральная вату можно рассматривать как разновидность минеральной ваты.

Сырье – горные породы: доломит, известняк, мергель, базальт, доменные шлаки, стеклянный бой.

Технология минеральной ваты:

- 1) получение минерального расплава в вагранках или ваннах печей;
- 2) превращение расплава в волокно путем использования дутьевого или центробежного способа.

Свойства минеральной ваты:

- 1) плотность – 75–150 кг/м³;
- 2) теплопроводность – 0,042–0,046 Вт/(м·°С);
- 3) температуростойкость – не менее 600 °С;
- 4) не горит, не гниет, не поедается грызунами, обладает биостойкостью.

Применяется для производства эффективной минераловатной теплоизоляции (маты, скорлупы, плиты) и в гранулированном виде в качестве теплоизоляционной засыпки пустотелых стен и перекрытий.

СИТАЛЛЫ

Ситалл – стекло, армированное кристаллами на уровне внутреннего строения.

Строение – *стеклокристаллическое*, получаемое путем направленной кристаллизации минерального расплава, между кристаллами равномерно распределена аморфная стекловидная фаза.

Сырье основное – то же, что для стекла.

Добавки – катализаторы направленной кристаллизации.

Технология – та же, что для стекла со следующими особенностями термообработки при охлаждении минерального расплава:

- 1) выдержка при температуре, соответствующей максимальной скорости образования центров кристаллизации;
- 2) выдержка при температуре, соответствующей максимальной скорости роста кристаллов.

Особенные **свойства**: повышенная механическая, термическая, химическая прочность; отсутствие хрупкости.

Шлакоситаллы – стеклокристаллические материалы, получающиеся путем направленной кристаллизации огненно-жидких шлаков.

Состав шлакоситаллов: огненно-жидкие шлаки; корректирующие химические добавки; катализаторы кристаллизации TiO_2 , CaF_2 , P_2O_5 .

Свойства: плотность – 2500–2650 кг/м³; прочность на сжатие 650 МПа, прочность при изгибе 120 МПа; высокая морозостойкость; повышенная химическая стойкость; малая истираемость.

5.3 Строительный раствор

Строительный раствор это искусственный камень, получаемый в результате затвердения смеси трех основных составляющих: *вяжущего вещества*, *затворителя* (воды) и мелкого заполнителя (песка).

Строительные растворы можно рассматривать как *мелкозернистые бетоны*, так как они отличаются от традиционного бетона меньшей крупностью заполнителя. Общие закономерности, характерные для бетона, применимы и для строительного раствора.

Особенности строительного раствора, которые должны учитываться при проектировании его состава:

- а) растворы, как правило, укладываются тонким слоем (1–2 см) без применения механического уплотнения;
- б) растворы могут наноситься на пористые основания, способные сильно отсасывать воду.

КЛАССИФИКАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

По назначению растворы бывают:

кладочные, которые применяют для скрепления элементов частей зданий (фундаментов, стен, столбов, сводов);

отделочные, которые служат для оштукатуривания поверхностей конструкций, декоративной отделки лицевых поверхностей;

специальные, которые применяют, когда к конструкциям предъявляют особые требования (жаростойкие, рентгенозащитные, акустические).

По виду заполнителя различают следующие строительные растворы:

тяжелые (обычные) растворы с плотностью более 1500 кг/м³;

легкие с плотностью менее 1500 кг/м³.

По виду вяжущего (в зависимости от условий эксплуатации) различают следующие строительные растворы: цементные растворы, известковые растворы, смешанные растворы).

СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

Плотность растворной смеси характеризуется отношением массы *уплотненной* растворной смеси к ее объему.

Удобоукладываемость – способность растворной смеси распределяться на основании тонким однородным слоем. Смесь должна равномерно заполнять все неровности и шероховатости основания, что служит условием надежного скрепления элементов кладки. Растворная смесь должна не расслаиваться при хранении, перевозке и перекачивании раствора насосами. Удобоукладываемость растворных смесей оценивается показателями *подвижности* и *водоудерживающей способности*.

Подвижность растворной смеси характеризуется измеряемой в сантиметрах глубиной погружения в нее эталонного конуса массой 300 г (рисунок 5.7).

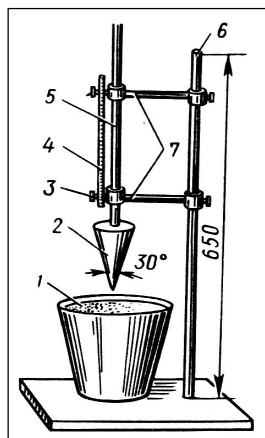


Рисунок 5.7 – Стандартный конус для определения подвижности

1 – сосуд для растворной смеси; 2 – эталонный конус; 3 – зажимной винт;
4 – шкала с делениями; 5 – скользящий стержень; 6 – направляющие;
7 – держатели

Водоудерживающая способность отражает свойство растворной смеси удерживать в своем составе достаточное для твердения вяжущего количество воды в условиях ее интенсивного отсоса пористым основанием.

Водоудерживающую способность определяют путем испытания слоя растворной смеси толщиной 12 мм, уложенного на промокательную бумагу, и рассчитывают по формуле:

$$V = \left(100 - \frac{m_2 - m_1}{m_3} \cdot 100 \right), \quad (5.2)$$

где m_1 – масса промокательной бумаги до испытаний, г;

m_2 – масса промокательной бумаги после испытания, г;

m_3 – масса растворной смеси, г.

Растворы с недостаточной водоудерживающей способностью склонны к *расслаиванию*, которая выражается в отделении воды и оседании песка.

Расслаиваемость растворной смеси, характеризующая ее *связность* при динамическом воздействии, определяют путем сопоставления *содержания массы заполнителя* в нижней и верхней частях свежееотформованного образца размером 150×150×150 мм. Содержание заполнителя в верхней (нижней) частях уплотненной растворной смеси V в процентах определяют по формуле:

$$V = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100, \quad (5.3)$$

где m_1 – масса отмытого высушенного заполнителя из верхней части образца, г;

m_2 – масса растворной смеси, отобранной из нижней части образца, г.

Показатель расслаиваемости растворной смеси Π в процентах определяют по формуле:

$$\Pi = \frac{\Delta V}{\Sigma V} \cdot 100, \quad (5.4)$$

где ΔV – абсолютная величина разности между содержанием заполнителя в верхней и нижней частях образца, %;

ΣV – суммарное содержание заполнителя в верхней и нижней частях образца, %.

Прочность раствора на сжатие (марка раствора) определяется на образцах-кубах размерами 70,7×70,7×70,7 мм в возрасте, установленном в стандарте или технических условиях на данный вид раствора. По прочности на сжатие растворы подразделяют на марки: $M 0,4$; $M 1,0$; $M 2,5$; $M 5,0$; $M 7,5$; $M 10,0$; $M 15,0$; $M 20,0$.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОГО СТРОИТЕЛЬНОГО РАСТВОРА

Требуемая *удобоукладываемость* достигается при правильном выборе соотношения между составляющими строительного раствора и надлежащим зерновом составе. Опытным путем установлено, что удобоукладываемая смесь получается в том случае, когда пустоты в песке заполнены *вяжущим тестом* и поверхность песчинок покрыта тонким слоем этого теста (рисунок 5.8). Примерное количество вяжущего для изготовления удобоукладываемой растворной смеси определяют следующим образом. При 40 % пустотности мелкого заполнителя общий объем пустот в 1 м^3 песка равен $0,4\text{ м}^3$. Для получения связной и удобоукладываемой смеси необходимо заполнить эти пустоты вяжущим тестом с некоторым избытком (примерно в 1,2 раза).

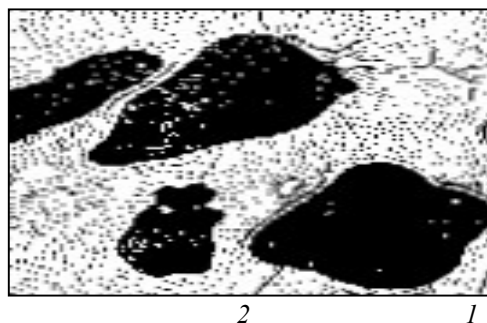


Рисунок 5.8 – Макроструктура строительного раствора

1 – вяжущее тесто; 2 – мелкий заполнитель

Таким образом, объем вяжущего теста должен быть равен $0,48\text{ м}^3$. При таком большом расходе *цемента* получается очень прочный раствор, что нерационально, так как для кладочных растворов необходима прочность 1–5 МПа, которая может быть обеспечена меньшим расходом цементного теста. Однако уменьшение расхода цементного теста не обеспечит необходимую удобоукладываемость строительного раствора.

Чтобы выполнить *условие по удобоукладываемости* необходимо расходовать цемента значительно больше, чем это необходимо по *условию прочности*.

Это противоречие устраняется следующими решениями:

- 1) применением *низкомарочных цементов* М200;
- 2) введением в цементное тесто *минеральных добавок*, обеспечивающих частичное заполнение пустот мелкого заполнителя (активные минеральные добавки – трепел, диатомит, пемза; добавки-наполнители – кварцевый песок, известняк, пыль электрофильтров);
- 3) применение добавок-пластификаторов, сообщающих смесям *требуемую удобоукладываемость* при небольшом количестве цементного теста.

При использовании гидравлического вяжущего необходимо обеспечить необходимые влажностные условия для обеспечения процесса твердения.

В условиях интенсивного отсоса влаги пористыми поверхностями основания это обеспечивается добавлением в строительный раствор *водоудерживающих добавок*, исключающих высыхание цементного камня в течение расчетного периода твердения (известь, глина и др.).

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАСТВОРОВ

Вяжущие вещества – гидравлические и воздушные неорганические вяжущие.

Мелкий заполнитель – к песку для растворов предъявляются те же требования, что и песку для тяжелых бетонов, с некоторыми особенностями:

- а) песок для кирпичной кладки должен иметь крупность не более 2 мм;

б) для отделочных растворов определяющим условием служит совместная работа отделочного слоя и основания, которая характеризуется величиной *адгезионной прочности сцепления* и малой *усадкой отделочного слоя*.

Водоудерживающие добавки вводят в строительный раствор в количестве 20–200 % от массы цемента (например, известь, глина, зола ТЭС, диатомит, трепел, молотый доменный шлак и т. д.). Они способны удерживать в своем составе значительное количество воды, образуя пластичное тесто.

Пластификаторы вводят в состав строительного раствора в количестве 0,03–0,3 % от массы цемента для повышения *удобоукладываемости*. В качестве пластификаторов используют *поверхностно-активные вещества* (например, мылонафт, кубовые остатки синтетических жирных кислот и т. д.).

Воздухововлекающие добавки вводят в строительный раствор для уменьшения его плотности и увеличения объема растворной смеси за счет образования *мелких воздушных пор* в процессе перемешивания (например, СДО – смола древесная омыленная, СНВ – смола нейтрализованная воздухововлекающая и т. д.).

ПРИМЕНЕНИЕ РАСТВОРОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ

Для **каменной кладки** используют цементные и цементно-известковые растворы. Вид и состав растворов зависят от расчетных напряжений и условий эксплуатации кладки.

При каменной кладке из камней правильной формы основное влияние на *прочность кладки* оказывает не марка вяжущего, а прочность самих камней.

Рекомендуемые составы известково-цементных растворов, (цемент)/(известковое тесто)/(песок), части по объему (по А. Г. Домокееву) (таблицы 5.2 и 5.3).

Таблица 5.2 – Рекомендуемые составы известково-цементных растворов (по А. Г. Домокееву)

Марка вяжущего	Марка растворов			
	25	50	75	100
Цементно-известковые растворы для надземных конструкций				
200	1/0,8/7	1/0,3/4	1/0,1/2,5	–
300	1/1,4/10,5	1/0,6/6	1/0,3/4	1/0,2/3,5
400	–	1/0,9/8	1/0,5/5,5	1/0,4/4,5

Таблица 5.3 – Рекомендуемые составы цементных растворов, (цемент)/(песок), части по объему

Марка вяжущего	Марка растворов			
	25	50	75	100
Цементные растворы для подземных конструкций				
200	–	1/4	1/2,5	–
300	–	1/6	1/4	1/3
400	–	–	1/5,5	1/4,5

Для **штукатурных растворов** используют цементно-известковые и известково-гипсовые растворы.

Цементно-известковые растворы и цементные растворы используют для получения прочных быстротвердеющих и водостойких штукатурных растворов. Их применяют для оштукатуривания конструкций, систематически увлажняющихся при эксплуатации (наружных стен, цоколей, парапетов).

Известково-гипсовыми растворами оштукатуривают внутренние деревянные и каменные стены. Введение гипсового вяжущего увеличивает скорость твердения и прочность сцепления известкового раствора с основанием, особенно деревянным.

Декоративные растворы предназначены для придания определенных архитектурно-художественных качеств фасадам и интерьерам зданий. В качестве *вяжущего* для наружных поверхностей применяют белый и цветные портландцементы, для внутренних поверхностей используют известковые и гипсовые вяжущие. Красящие добавки – свето-, щелоче-, кислотостойкие

пигменты природного и искусственного происхождения. Заполнители – кварцевые, керамические, стеклянные, угольные пески.

Гидроизоляционные растворы используют для обеспечения водонепроницаемости. Состав гидроизоляционного раствора (цемент/песок) по массе от (1/2,5) до (1/3,5). Растворы плотной структуры изготавливают на портландцементе, сульфатостойком портландцементе, расширяющемся цементе.

Используют для гидроизоляционных слоев, стяжек, штукатурок.

Рентгенозащитный раствор изготавливают на портландцементе и баритовом песке, содержащем соли бария $BaSO_4$, с добавкой в раствор солей легких элементов (литий, бор). В качестве наполнителя можно использовать тяжелые металлы (свинец).

Акустические растворы изготавливают на портландцементе, шлакопортландцементе, извести, гипсовых вяжущих и др.. Заполнители – монофракционный пористый песок (например, перлит, пемза, керамзит, пенополистирол и др.), обеспечивают высокую равномерно распределенную пористость. Для звукопоглощения необходимо дополнительно обеспечить высокую открытую пористость. Применяют для звукоизоляции и поглощения шума в помещениях.

5.4 Бетоны

Бетоны – искусственные каменные материалы, получаемые в результате затвердевания **бетонной смеси**, состоящей из **вяжущего вещества, затворителя, мелкого заполнителя и крупного заполнителя**.

Название бетонная смесь получает в зависимости от вида вяжущего (например, **цементный бетон** на портландцементе, **гипсовый бетон** на гипсовом вяжущем, **силикатный бетон** на

известково-кремнеземистом вяжущем, *асфальтобетон* на битумном вяжущем, *полимербетон* на полимерных смолах.

Наибольшее распространение в строительстве получили бетоны на портландцементных вяжущих.

Вяжущее вещество (портландцемент) и **затворитель** (вода) являются *активными составляющими* бетона, в результате реакции гидратации между ними образуется **цементный камень**, скрепляющий зерна заполнителей.

Мелкий заполнитель (песок) и **крупный заполнитель** (гравий, щебень) образуют жесткий скелет *тяжелого бетона* и уменьшают его усадку, вызываемой усадкой цементного камня при его твердении. В *легких бетонах* пористый заполнитель уменьшает плотность и теплопроводность бетона.

Добавки в бетонную смесь вводятся для регулирования *свойств бетонной смеси* (удобоукладываемости, сроков схватывания, твердения в условиях отрицательной температуры), а также для обеспечения необходимых специальных *свойств бетона* (плотности, водонепроницаемости, морозостойкости).

5.4.1 Классификация бетонов

По *средней плотности* бетоны подразделяются на пять групп:

1) **особо тяжелый** бетон с плотностью выше 2600 кг/м^3 , содержащий заполнители, истинная плотность которых значительно больше, чем *природных каменных материалов* (например, стальные опилки или зерна (сталебетон), железные руды или барит (баритовый бетон) и т. д.);

2) **тяжелый** бетон с плотностью $2100\text{--}2600 \text{ кг/м}^3$, содержащий *плотные и прочные заполнители* из природных каменных материалов (например, песок, щебень гравий);

3) **облегченный тяжелый бетон** – 1800–2100 кг/м³, содержащий *плотные и прочные заполнители* из природных каменных материалов (например, песок, щебень гравий) и *поризованный цементный камень*;

4) **легкий бетон** с плотностью 1200–1800 кг/м³, содержащий *пористые заполнители* (например, вулканическую пемзу, керамзит, шлаковую пемзу, туф и др.);

5) **особо легкий бетон** с плотностью менее 1200 кг/м³ (например, ячеистый бетон, пенобетон, газобетон и др.)

По **назначению** бетоны делятся на шесть видов:

1) **обычный** (тяжелый бетон) – для железобетонных конструкций: фундаментов, колонн, балок, перекрытий, мостов и др.; характеризуются заданной прочностью и морозостойкостью;

2) **гидротехнический** (тяжелый бетон) – для плотин, облицовки каналов, водопроводно-канализационных сооружений; характеризуются высокой плотностью, водонепроницаемостью, морозостойкостью, прочностью, малой усадкой, малым тепловыделением при твердении, стойкостью против коррозии;

3) **бетон для стен зданий** (легкий бетон); имеют расчетную прочность, небольшую плотность, проектное термическое сопротивление;

4) **теплоизоляционный** (особо легкий бетон); характеризуются малой теплопроводностью; высоким термическим сопротивлением;

5) **бетон для полов, тротуаров, дорожных и аэродромных покрытий** (тяжелый бетон); характеризуется повышенной прочностью на изгиб и ударную стойкость, высокой морозостойкостью и износостойкостью;

6) **специального назначения** (тяжелый и особо тяжелый бетон), например, кислотоупорный, жаропрочный, радиационно-защитный и др.).

По **виду вяжущего** бетоны подразделяются:

1) бетоны на **портландцементных** вяжущих, изготавливаемые на основе клинкерных цементов (портландцемент, шлакопортландцемент, пуццолановый портландцемент, глиноземистый портландцемент и т. д.);

2) бетоны на **известковых** вяжущих, получаемые на основе извести в сочетании с гидравлически активными и кремнеземистыми компонентами;

3) бетоны на **гипсовых** вяжущих, изготавливаемые на основе полуводного гипса и гипсоцементно-пуццолановых вяжущих;

4) бетоны на **шлаковых** вяжущих, изготавливаемые на основе молотых шлаков и зол;

5) бетоны на **специальных** вяжущих (органических или неорганических), изготавливаемые на основе полимерных, фосфатных, магнезиальных связующих и на жидком стекле.

По виду заполнителей:

1) бетоны на **плотных** заполнителях, получаемых из плотных горных пород (например, гранит, базальт) или отходов промышленности (например, металлургические шлаки);

2) бетоны на **пористых** заполнителях, искусственных (керамзит, аглопорит) или естественных (туф, пемза);

3) бетоны на **специальных** заполнителях, придающих бетону особые функциональные свойства (на шамоте – жаростойкость, на лимоните – радиоактивное поглощение и т. д.).

По характеру структуры различают:

1) бетон **плотной** (слитной) структуры, в которых пространство между зернами заполнителя полностью занято *плотным цементным камнем*;

2) **поризованные** бетоны, в которых все пространство между зернами плотного заполнителя занято *пористым цементным камнем*;

3) **крупнопористые** (безпесчаные) бетоны, в которых между зернами крупного заполнителя находятся не занятые цементным камнем и мелким заполнителем крупные воздушные поры;

4) **ячеистые** бетоны, состоящие из отвердевшей смеси вяжущего вещества, кремнеземистого компонента и порообразующей добавки, которая формирует равномерно распределенную пористость; сюда можно отнести пенобетоны и газобетоны.

5.4.2 *Требования к составляющим бетонной смеси*

ВЯЖУЩЕЕ

Марка цемента выбирается в зависимости от проектной марки бетона и должна быть не меньше марки бетона.

Разница между проектной маркой бетона и применяемого цемента уменьшается с увеличением марки бетона.

Рекомендуемое соотношение между марками бетона и цемента (марка бетона/марка цемента): *M100/M300, M200/M300, M400, M250/M400, M300/M400, M500, M 400/M500, M600, M500/M600, M600/M600.*

ВОДА ЗАТВОРЕНИЯ

Для приготовления бетонной смеси используют водопроводную питьевую, а также воду, имеющую водородный показатель $pH \geq 4$.

Качество воды оценивают по *содержанию вредных примесей*, которые могут препятствовать нормальному схватыванию и твердению вяжущего вещества, либо вызывают появление в структуре бетона новообразований, уменьшающих его прочность и долговечность.

Содержание вредных примесей в воде и суммарное их количество ограничивается стандартом.

ЗАПОЛНИТЕЛИ

В тяжелом бетоне на плотных заполнителях вяжущее тесто расходуется на *смачивание* поверхности зерен заполнителя и *заполнение* пустот между ними.

В заполнителе соотношение между зернами разного размера должно быть оптимальным, при котором *объем пустот и суммарная поверхность зерен* требуют минимального расхода цемента для приготовления не расслаиваемой бетонной смеси заданной *удобоукладываемости* и получения бетона заданной плотности и прочности.

Заполнителями для бетона (щебень, гравий, песок) называют рыхлую *смесь минеральных зерен* природного или искусственного происхождения, размеры которых находятся в диапазоне от 0,14 до 70 мм.

Занимая до 85–90 % общего объема бетона, заполнители влияют на технологические свойства бетонной смеси и на качество бетона.

По **фракционному составу** различают:

- 1) *мелкий заполнитель* (песок) с размерами минеральных частиц 0,16–5 мм;
- 2) *крупный заполнитель* (щебень или гравий) с размерами минеральных частиц 5–70 мм.

По **происхождению**:

- 1) *природные заполнители* (гранит, диабаз, известняк, туф, кварцит, мрамор и т. д.);
- 2) *искусственные заполнители* (керамзит, шлаковая пемза и т. д.);
- 3) *заполнители из отходов промышленности* (шлаковая пемза, золошлаковые смеси и т. д.).

По **плотности** различают:

- 1) *плотные* заполнители ($\rho > 2000 \text{ кг/м}^3$);
- 2) *пористые* заполнители ($\rho < 2000 \text{ кг/м}^3$).

Важнейшими показателями качества заполнителей являются: плотность, зерновой и минеральный составы, форма и характер поверхности зерен, содержание вредных примесей, прочность и морозостойкость.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И КРУПНОСТИ ЧАСТИЦ ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА РАСХОД ВЯЖУЩЕГО ТЕСТА ДЛЯ СМАЧИВАНИЯ

При равном объеме отдельного куска заполнителя, *площадь поверхности смачивания* будет больше у заполнителя угловатой формы (щебень), чем округлой (гравий). Например, для шара диаметром D , объем частицы составит $(1/6)\pi D^3$, а площадь поверхности шара . Приравнивание объема шара к объему куба, получим размер стороны куба $l=[(1/6)\pi]^{1/3}D$ и суммарную площадь поверхности $6l^2=6[(1/6)\pi]^{1/3}D$. Отношение площади поверхности куба и шара (при одинаковой объеме) показывает, что площадь куба в ... больше площади шара.

При одном и том же суммарном объеме заполнителей, *площадь поверхности смачивания* будет тем больше, чем меньше *крупность отдельного зерна*. Например, для куба со стороной 1 см (щебень) объем равен 1 см³, а его поверхность составит 6 см². При рассечении этого куба ортогональной секущей плоскостью на две части суммарный объем и суммарная масса не изменятся, а общая поверхность двух частиц увеличиться до 8 м². При дальнейшем рассечении куба до частиц объемом 1 мм³ (песок) суммарная поверхность составит уже 60 см² и будет непрерывно возрастать при дальнейшем уменьшении частиц.

Из приведенного выше следует:

1) для одного и того же объема заполнителей суммарный расход цементного теста на смачивание *возрастает* с уменьшением размера отдельных частиц;

2) *наименьший* расход вяжущего теста на смачивание достигается в том случае, когда общая площадь поверхности стремится к минимуму;

3) при использовании щебня вместо гравия расход вяжущего теста *увеличивается* за счет более развитой поверхности у частиц щебня по сравнению с гравием при одной и той же объеме отдельной минеральной частицы;

4) при использовании мелких песков, вместо крупных, расход цементного теста *увеличивается* за счет большей площади суммарной поверхности частиц;

5) при наличии пылеватых частиц расход вяжущего теста *увеличивается* за счет увеличения площади для смачивания.

Поэтому содержание зерен *пылеватых частиц* приравнивается к вредным примесям и ограничивается стандартом.

ВЛИЯНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА РАСХОД ВЯЖУЩЕГО ТЕСТА

Можно показать, что при одном и том же суммарном объеме заполнителя *величина межзерновой пустотности* – отношение объема пор к общему объему материала – *не зависит от крупности зерен*. Если в кубе со стороной D и объемом D^3 разместить шар диаметром D , то отношение объема пустот к объему куба, т. е. пустотность, составит:

$$\frac{\left(D^3 - \frac{1}{6}\pi D^3\right)}{D^3} = 1 - \frac{1}{6}\pi = 0,476. \quad (5.5)$$

Эта относительная величина не зависит от *величины диаметра* вписываемых шаров, поэтому отношение суммарного объема пустот к объему куба при заполнении куба шарами одного и того же диаметром не изменится, при этом *величина межзерновой пустотности* останется равной 47,6 %.

Из приведенных выше расчетов следует:

1) объем пустот в заполнителе, представленном *зернами одного размера*, не зависит от крупности зерна, а определяется типом их упаковки;

2) наименьший расход вяжущего теста достигается в том случае, когда *межзерновая пустотность* заполнителя стремится к минимуму;

3) для частиц одного размера величина *межзерновой пустотности* является максимально возможной;

4) для уменьшения межзерновой пустотности заполнителя необходимо вводить в его состав *зерна разного размера*, более мелкие из которых заполнили бы промежутки между более крупными частицами;

5) чем больше количество фракций, тем меньшую *межзерновую пустотность* теоретически можно получить.

Поэтому требования стандартов направлены на достижение такого *фракционного состава* заполнителя, при котором объем пустот и суммарная поверхность зерен требуют минимального расхода цемента для приготовления *не расслаиваемой бетонной смеси* требуемой *удобоукладываемости* и получения бетона заданной *плотности* и *прочности*.

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТЬ

По *характеру формы* зерна заполнителя различают:

1) *угловатую* форму, которую имеет природный щебень или получают дроблением горных пород и искусственных материалов;

2) *округлую* форму, которую имеют природный гравий и песок.

Форма зерен заполнителя влияет на *удобоукладываемость* бетонных смесей. В этом отношении предпочтительны *зерна округлой или кубовидной формы*.

Пластинчатые и удлиненные (лещадные) зерна не обеспечивают однородности структуры бетона за счет ориентирования пластинчатых зерен в горизонтальном направлении.

Лещадные зерна также приводят к увеличению расхода вяжущего теста за счет их способности к сводообразованию.

Содержание зерен *лещадной формы* ограничивается стандартом.

Минералогический состав заполнителей оценивают с помощью петрографической характеристики (по-гречески «*петра*» – камень, «*графа*» – пишу), которая включает наименование, происхождение, содержание основных породообразующих материалов, оценку трещиноватости и степени выветривания, наличие вредных примесей, радиационно-гигиеническую оценку и др.

К **вредным примесям** относят включения минералов – сульфатов, сульфидов, аморфных разновидностей кремнезема (халцедона, опала, вулканических стекол), наличие пылеватых, глинистых и органических примесей. Содержание вредных примесей ограничивается стандартом.

5.4.3 Затворитель – вода

Для приготовления бетонной смеси используют **водопроводную питьевую**, а также любую воду, имеющую водородный показатель *pH* от 4 до 12,5.

Количество растворимых солей, в том числе сульфатов, хлоридов, и количество взвешенных частиц ограничивается требованиями стандарта.

Морская вода и другие соленые воды, удовлетворяющие приведенным выше условиям, применяются для приготовления бетонной смеси.

В технологии бетонных работ вода используется для следующих целей:

- 1) приготовление бетонных и растворных смесей;
- 2) поливка конструкций в процессе твердения бетона;
- 3) промывка заполнителей.

Качество воды оценивают по содержанию вредных примесей, которые могут препятствовать нормальному схватыванию и твердению вяжущего вещества, либо вызывают появление в структуре бетона новообразований, уменьшающих его прочность и долговечность.

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Содержание в воде органических поверхностно-активных веществ, сахаров или фенолов, каждого, не должно быть более 10 мг/л. Вода не должна содержать пленки нефтепродуктов, жиров, масел. В воде для бетонных смесей и поливки бетона не должно быть окрашивающих примесей, если к бетону предъявляют требования технической эстетики.

Содержание в воде растворимых солей, ионов SO_4^{-2} , Cl^{-1} и взвешенных частиц не должно превышать величин, указанных в таблице 5.4.

Окисляемость воды не должна быть более 15 мг/л.

Вода не должна содержать также примесей в количествах, нарушающих сроки схватывания и твердения цементного теста и снижающих прочность и морозостойкость бетона.

5.4.4 Крупный заполнитель – гравий и щебень

Гравий – материал на основе горных пород с размерами зерен от 5 до 70 мм, имеющих округлую форму. При содержании песка 25–40 % материал называют *песчано-гравийной* смесью.

В зависимости от происхождения различают: *горный* гравий; *речной* гравий; *морской* гравий.

Щебень – материал на основе горных пород с размерами зерен от 5 до 70 мм, имеющих угловатую форму. Щебень преимущественно получают дроблением горных пород. Зерна щебня имеют угловатую форму и более развитую, чем у гравия поверхность.

Щебень и гравий отличаются только формой.

Особенности гравия:

1) гравий встречается в природе в готовом для использования раздробленном состоянии;

2) гравий обеспечивает лучшую подвижность бетонной смеси из-за меньшего, чем при щебне, силе поверхностного сцепления с цементным раствором за счет менее развитой удельной поверхности.

Особенности щебня:

1) щебень имеет большее сцепление с цементным раствором при затвердевании вследствие более развитой удельной поверхности по сравнению с гравием;

2) щебень в бетоне имеет более высокую сопротивляемость при усилиях сдвига;

3) щебень, полученный дроблением горных пород, меньше содержит примесей, требующих промывки.

Таблица 5.4 – Максимальное допустимое содержание в воде растворимых солей, ионов SO_4^{-2} , Cl^{-1} и взвешенных частиц

Назначение воды	Максимальное содержание, мг/л			
	солей	SO_4^{-2}	Cl^{-1}	частиц
1. Вода для затворения бетонной смеси при изготовлении напряженных железобетонных конструкций	2000	600	350	200

2. Вода для затворения бетонной смеси при изготовлении бетонных и железобетонных конструкций с ненапрягаемой арматурой	5000	2700	1200	200
3. Вода для затворения бетонной смеси при изготовлении бетонных неармированных конструкций, к которым не предъявляются требования по ограничению образования высолов, а также бетона бетонных и железобетонных конструкций подводной и внутренней зон массивных сооружений	10000	2700	3500	300
4. Вода для промывки заполнителей, включая мокрую контрольную сортировку и охлаждение заполнителей	5000	2700	1200	500
5. Вода для поливки рабочих швов при перерывах в бетонировании, поверхностей стыков подлежащих омоноличиванию поверхностей водосбросных конструкций, а также вода для трубного охлаждения массива бетона	1000	500	350	200
6. Вода для поливки законченных наружных поверхностей бетонных и железобетонных конструкций.	5000	2700	1200	500
7. Вода для поливки наружных поверхностей бетонных конструкций, если на поверхности может быть допущено появление выцветов, высолов	35000	2700	20000	500
Допускается применение технических и природных вод, загрязненных стоками, содержащими примеси в количествах, превышающих установленные в таблице, кроме примесей ионов Cl^{-1} , при условии обязательного соответствия качества бетона показателям, заданным проектом				

В зависимости от происхождения гравий и щебень имеют показатели, которые ограничиваются стандартом:

- 1) содержание пылевидных и глинистых частиц;
- 2) содержание зерен слабой породы (известняк);
- 3) содержание зерен пластинчатой (лещадной) и иглообразной формы.

Требования к крупности заполнителя:

- 1) наибольшая крупность зерен заполнителя при бетонировании плит должна быть не более половины толщины плиты;

2) размер зерен заполнителя принимают не более 1/6 наименьшего размера поперечного сечения конструкции при монолитном бетонировании;

3) наибольшая крупность заполнителя должна быть не более 3/4 наименьшего расстояния в свету между стержнями арматуры при изготовлении железобетонных конструкций.

Требования к **прочности** заполнителя

Прочность крупного заполнителя нормируются с учетом прочности бетона и должна быть выше проектной прочности бетона.

СТАНДАРТНЫЕ СВОЙСТВА КРУПНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

Зерновой состав щебня (гравия) определяют путем рассева пробы m на *стандартном наборе сит*, расположенных по убываю размеров отверстий.

По результатам просеивания получают *массу остатка* m_i на каждом сите и вычисляют **частный остаток** a_i на каждом сите в процентах по формуле

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100, \quad (5.6)$$

где m_i – масса остатка на данном сите, г;

m – масса пробы, г.

Частный остаток – это отношение *массы остатка* m_i на данном сите к *общей массе* m просеиваемого материала.

Затем определяют *полные остатки* A_i на каждом сите, равные сумме частных остатков на данном сите и всех предыдущих ситах с большими размерами отверстий:

$$A_i = a_i + a_{i+1} + a_{i+2} + \dots + a_n, \quad (5.7)$$

где $a_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n$ – частные остатки на i -м сите и всех ситах стандартного набора с большими размерами отверстий;

$i, i+1, i+2, \dots, n$ – порядковые номера сит
стандартного набора.

Полный остаток A_i на данном сите – это **сумма частных остатков**, включающая **частный остаток** a_i на данном сите и все **частные остатки** на ситах большего размера.

По данным ситового анализа строят **кривую рассева** (рисунок 5.9), характеризующую зерновой состав щебня (гравия). Для этого по оси абсцисс откладывают размеры отверстий сит, соответствующих наибольшему и наименьшему диаметрам щебня, на оси ординат – величину полных остатков в процентах.

Наибольшая $D_{\text{НАИБ}}$ крупность щебня (гравия) характеризуется размером отверстий сита, полный остаток на котором составляет не более 5 %.

$D_{\text{НАИБ}}$ щебня (гравия) – это номер сита i , **полный остаток** A_i на котором составляет не более 5%.

Наименьшая $D_{\text{НАИМ}}$ крупность щебня (гравия) характеризуется размерами отверстий сита, полный остаток на котором составляет не менее 95 %.

$D_{\text{НАИМ}}$ щебня (гравия) – это номер сита i , **полный остаток** A_i на котором составляет не менее 95 %.

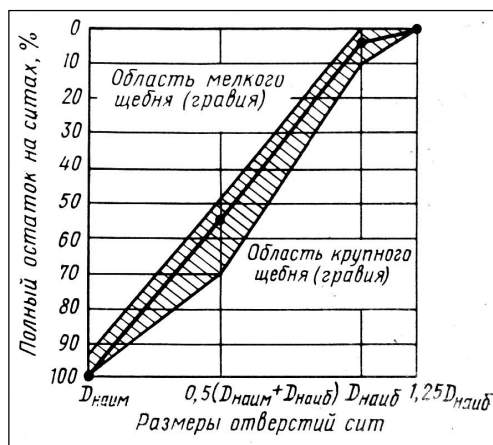


Рисунок 5.9 – Кривая отсева

Содержание в щебне (гравии) отмучиваемых **пылевидных** и **глинистых частиц** $P_{отм}$ в процентах по массе вычисляют по формуле:

$$P_{отм} = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100, \quad (5.8)$$

где m – первоначальная масса пробы, г;

m_1 – масса пробы после отмучивания частиц, г.

Истинную плотность ρ_u в г/см³ вычисляют по формуле

$$\rho_u = \frac{m \rho_B}{m + m_1 - m_2}, \quad (5.9)$$

где m – масса навески порошка, высушенного до постоянной массы, г;

m_1 – масса пикнометра с дистиллированной водой, г;

m_2 – масса пикнометра с навеской и дистиллированной водой после удаления пузырьков воздуха, г;

ρ_B – плотность воды, равная 1 г/см³.

Среднюю плотность образцов горной породы произвольной формы или щебня (гравия) ρ_{CP} в г/см³ вычисляют по формуле:

$$\rho_B = \frac{g \cdot \rho_B}{g_1 - g_2}, \quad (5.10)$$

где g – вес образца или пробы в сухом состоянии, г;

g_1 – вес образца или пробы в насыщенном водой состоянии на воздухе, г;

g_2 – вес образца или пробы в насыщенном водой состоянии в воде, г;

ρ_B – плотность воды, равная 1 г/см³.

Среднюю плотность парафинированных образцов горной породы произвольной формы ρ_{CP} в г/см³ вычисляют по формуле:

$$\rho_{CP} = \frac{m}{\left(\frac{g_1 - g_2}{\rho_B} \right) - \left(\frac{m_1 - m}{\rho_{II}} \right)}, \quad (5.11)$$

где m – масса образца в сухом состоянии, г;

m_1 – масса парафинированного образца в сухом состоянии, г;

g_1 – вес парафинированного образца на воздухе, г;

g_2 – вес парафинированного образца в воде, г;

ρ_{II} – плотность парафина (может быть принята 0,93 г/см³);

ρ_B – плотность воды, равная 1 г/см³.

Пористость горной породы или зерен щебня (гравия) $\Pi_{ПОР}$ в процентах по объему вычисляют по формуле:

$$\Pi_{\text{пор}} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{ср}}}{\rho_{\text{н}}}\right) 100, \quad (5.2)$$

где $\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность горной породы или зерен щебня (гравия), г/см³;

$\rho_{\text{н}}$ – истинная плотность горной породы или зерен щебня (гравия), г/см³.

Насыпную плотность щебня (гравия) $\rho_{\text{н}}$ вычисляют с точностью до 10 кг/м³ по формуле:

$$\rho_{\text{н}} = \frac{m_1 - m}{V}, \quad (5.13)$$

где m – масса мерного цилиндра, кг;

m_1 – масса мерного цилиндра со щебнем (гравием), кг;

V – объем мерного цилиндра, м³.

Пустотность щебня (гравия) $\Pi_{\text{пуст}}$ в процентах по объему вычисляют по формуле:

$$\Pi_{\text{пуст}} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{ср}} \cdot 1000}\right) \cdot 100, \quad (5.14)$$

где $\rho_{\text{н}}$ – насыпная плотность щебня (гравия), кг/м³;

$\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность зерен щебня (гравия), г/см³.

Влажность щебня (гравия) W в процентах по массе вычисляют по формуле:

$$W = \frac{m_B - m}{m} \cdot 100, \quad (5.15)$$

где m_B – масса пробы в состоянии естественной влажности, г;

m – масса пробы в сухом состоянии, г.

Водопоглощение $W_{\text{ПОГЛ}}$ в процентах по массе вычисляют по формуле:

$$W_{\text{ПОГЛ}} = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100, \quad (5.16)$$

где m – масса образца или пробы в сухом состоянии, г;
 m_1 – масса образца или пробы в насыщенном водой состоянии, г.

Предел прочности образца $R_{\text{СЖ}}$ вычисляют с точностью до 1 МПа (10 кгс/см²) по формуле:

$$R_{\text{СЖ}} = \frac{P}{F}, \quad (5.17)$$

где P – разрушающее усилие пресса, Н (кгс);
 F – площадь поперечного сечения образца, см².

Прочность щебня и гравия характеризуют **маркой**, определяемой по дробимости щебня (гравия). **Дробимость** щебня (гравия) определяют по степени разрушения зерен при сжатии (раздавливании) в цилиндре.

Коэффициент дробимости D_p в процентах вычисляют с погрешностью до 1 % по формуле:

$$D_p = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100, \quad (5.18)$$

где m – масса аналитической пробы щебня (гравия), г;
 m_1 – масса остатка на контрольном сите после просеивания раздробленной в цилиндре пробы щебня (гравия), г.

Таблица 5.5 – Марка по дробимости щебня из изверженных пород

Марка по дробимости щебня из изверженных пород	Потери массы при испытании щебня, %	
	из интрузивных пород	из эффузивных пород
1400	до 12 включ.	до 9 включ.
1200	св. 12 до 16	св. 9 до 11
1000	св. 16 до 20	св. 11 до 13
800	св. 20 до 25	св. 13 до 15
600	св. 25 до 34	св. 15 до 20

Таблица 5.6 – Марка по дробимости щебня из осадочных
и метаморфических пород

Марка по дробимости щебня из осадочных и метаморфических пород	Потеря массы при испытании щебня, проценты	
	в сухом состоянии	в насыщенном во- дой
1200	до 11 включ.	до 11 включ.
1000	св. 11 до 13	св. 11 до 13
800	св. 13 до 15	св. 13 до 15
600	св. 15 до 19	св. 15 до 20
400	св. 19 до 24	св. 20 до 28
300	св. 24 до 28	св. 28 до 38
200	св. 28 до 35	св. 38 до 54

Содержание зерен слабых пород $X_{сл}$ в процентах вычисляют по формуле:

$$X_{сл} = \frac{m_1}{m} \cdot 100, \quad (5.19)$$

где m_1 – масса зерен слабых пород, г;
 m – общая масса пробы, г.

Морозостойкость щебня (гравия) определяют по потере массы пробы при последовательном замораживании и оттаивании насыщенных водой зерен.

Потерю массы пробы Δm в процентах вычисляют по формуле:

$$\Delta m = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100, \quad (5.20)$$

где m – масса пробы до испытания, г;

m_1 – масса остатка на сите после соответствующего цикла замораживания и оттаивания, г.

Коэффициент снижения прочности горной породы при насыщении водой определяют по отношению прочности образцов в насыщенном водой и сухом состояниях.

Коэффициент снижения прочности горной породы K_p при насыщении водой вычисляют по формуле:

$$K_p = \frac{R_B}{R_C} \leq 1, \quad (5.21)$$

где R_B – среднее арифметическое значение предела прочности насыщенных водой образцов, Па (кгс/см²);

R_C – среднее арифметическое значение предела прочности образцов, высушенных до постоянной массы, Па (кгс/см²).

Истираемость щебня I в процентах вычисляют по формуле:

$$I = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100, \quad (5.22)$$

где m – масса пробы щебня (гравия) до испытания, г.

где m_l – масса пробы щебня (гравия) после испытания, г.

Таблица 5.7 – Марка по истираемости щебня и гравия

Марка по истираемости щебня и гравия	Потеря массы при испытании, проценты	
	щебня	гравия
<i>И1</i>	до 25 включ.	до 20 включ.
<i>И2</i>	св. 25 до 35	св. 20 до 30
<i>И3</i>	св. 35 до 45	св. 30 до 40
<i>И4</i>	св. 45 до 60	св. 40 до 50

Морозостойкость щебня и гравия характеризуют числом циклов замораживания и оттаивания, при котором потери в процентах по массе щебня и гравия не превышают установленных значений, приведенных в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Морозостойкость щебня и гравия

Вид испытания	Марка по морозостойкости щебня и гравия							
	<i>F15</i>	<i>F25</i>	<i>F50</i>	<i>F100</i>	<i>F150</i>	<i>F200</i>	<i>F300</i>	<i>F400</i>
Замораживание – оттаивание, число циклов	15	25	50	100	150	200	300	400
потеря массы после испытан- ия, проценты, не более	10	10	5	5	5	5	5	5
Насыщение в растворе серно- кислого натрия – высушивание, число циклов	3	5	10	10	15	15	15	15
потеря массы после испытан- ия, проценты, не более	10	10	10	5	5	3	2	1

Устойчивость структуры щебня против всех видов распадов должна соответствовать требованиям, указанным в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Устойчивость структуры щебня против всех видов распадов

Марка по дробимости щебня	Потери массы при распаде, проценты, не более
1000 и выше	3
800, 600	5
400 и ниже	7

5.4.5 Мелкий заполнитель – песок

Песок – рыхлая смесь горных пород с крупностью зерен 0,14–5 мм.

Для приготовления тяжелого бетона используются пески естественные (*речной, морской, овражный*) и искусственные (продукт дробления горных пород).

КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕСКОВ

По минеральному составу различают: *кварцевые* пески; *полевошпатные* пески; *карбонатные* пески, *смешанные* пески.

По условиям образования выделяют:

1) *речные* пески – характеризуются округлой (гравийной) формой и содержанием илистых примесей;

2) *морские* пески – характеризуются округлой (гравийной) формой, имеют известняковые примеси в виде обломков раковин;

3) *овражные (горные)* пески – характеризуются угловатой (щебенистой) формой, имеют глинистые и пылеватые примеси.

Действие вредных примесей

1) *глинистые* и *пылеватые частицы* имеют сильно развитую удельную поверхность, что требует большое количество

цементного теста для их обволакивания при получении цементно-песчаного раствора; увеличение поверхности смачивания повышает *водопотребность* бетонной смеси, что приводит к увеличению пористости вяжущего камня, снижению прочности и морозостойкости;

2) *илистые* частицы, имеющие органическое происхождение, могут влиять на прочность долговечность цементного камня;

3) *сернистые и сернокислые соединения* способствуют кислотной коррозии цементного камня;

4) *слиуды* снижают прочность бетона за счет слабого адгезионного сцепления с цементным камнем;

5) зерна *аморфного кремнезема* способны вызвать коррозию цементного камня.

Во всех случаях содержание в песке вредных примесей ограничивается стандартом.

Для получения плотного бетона все *межзерновые пустоты* в песке должны быть заполнены цементным тестом. Поэтому *межзерновая пустотность* песка является важной характеристикой при выборе песка.

Для тяжелого бетона наиболее пригоден крупный песок, содержащий минимальное количество межзерновых пустот, соответствующий стандартному *гранулометрическому составу*, находящемуся в области песков для производства строительных бетонов и растворов.

Крупность зерен песка определяется просеиванием песка через стандартный набор сит, имеющих отверстия 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,3 и 0,14 мм.

Гранулометрический состав песка характеризуется *массой остатка* на каждом сите по степени крупности.

Частный остаток на каждом сите равен отношению массы остатка к общей массе просеиваемого материала.

Полный остаток на каждом сите равен сумме частных остатков, включающей частный остаток на данном сите и все частные остатки на ситах большего размера.

Модуль крупности песка M_K это сумма полных остатков на всех ситах (в процентах), деленная на 100.

Кривая зернового состава песка должна укладываться в нормативные пределы, установленные стандартом.

СТАНДАРТНЫЕ СВОЙСТВА ПЕСКА

Истинная плотность песка – масса единицы объема песка в абсолютно-плотном состоянии (без пор и пустот).

Истинную плотность песка ρ в г/см³ вычисляют по формуле:

$$\rho = \frac{(m - m_1)\rho_B}{m - m_1 + m_2 - m_3}, \quad (5.24)$$

где m – масса пикнометра с песком, г;

m_1 – масса пустого пикнометра, г;

m_2 – масса пикнометра с дистиллированной водой, г;

m_3 – масса пикнометра с песком и водой после удаления пузырьков воздуха, г;

ρ_B – плотность воды, равная 1 г/см³.

Насыпная плотность песка – масса единицы объема песка в естественно-насыпном состоянии:

$$\rho_H = \frac{m}{V_H}, \quad (5.25)$$

где m – масса песка, кг;

V_H – объем песка в насыпном состоянии, м³.

Пустотность песка $\Pi_{пуст}$ при естественной влажности определяют по предварительно найденным значениям *истинной плотности* ρ_H и *насыпной плотности* ρ_H :

$$\Pi_{пуст} = \left(1 - \frac{\rho_H}{\rho_H} \right) 100\% \quad (5.26)$$

где $\Pi_{пуст}$ – пустотность песка, проценты;

ρ_H – насыпная плотность песка, г/см³;

ρ_H – средняя плотность песка, г/см³.

Зерновой состав определяют путем отсева песка на стандартном наборе сит.

По результатам просеивания вычисляют:

частный остаток a_i на каждом сите i в процентах по формуле:

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100, \quad (5.27)$$

где m_i – масса остатка на данном сите, г;

m – масса просеиваемой навески, г;

i – номер сита.

полный остаток на каждом сите A_i в процентах по формуле:

$$A_i = a_{2,5} + a_{1,25} + \dots a_i, \quad (5.28)$$

где $a_{2,5}$, $a_{1,25}$, a_i – частные остатки на ситах.

Таблица 5.10 – Результаты определение зернового состава

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах				
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16 (0,14)
Масса	$m_{2,5}$	$m_{1,25}$	$m_{0,63}$	$m_{0,315}$	$m_{0,16}$
Частный	$a_{2,5}$	$a_{1,25}$	$a_{0,63}$	$a_{0,315}$	$a_{0,16(0,14)}$
Полный	$A_{2,5}$	$A_{1,25}$	$A_{0,63}$	$A_{0,315}$	$A_{0,16(0,14)}$

Вычисляют **модуль крупности песка** M_K без зерен крупнее 5 мм:

$$M_K = \frac{A_{2,5} + A_{1,25} + A_{063} + A_{0315} + A_{016}}{100}, \quad (5.29)$$

где $A_{2,5}$, $A_{1,25}$, A_{063} , A_{0315} , A_{016} – полные остатки на сите с круглыми отверстиями диаметром 2,5 мм и на ситах с сетками № 1,25; 063; 0315; 016, %.

Таблица 5.11 – Значения модуля крупности для групп песка

Группа песка	Модуль крупности M_K
Очень крупный	св. 3,5
Повышенной крупности	св. 3,0 до 3,5
Крупный	св. 2,5 до 3,0
Средний	св. 2,0 до 2,5
Мелкий	св. 1,5 до 2,0
Очень мелкий	св. 1,0 до 1,5
Тонкий	св. 0,7 до 1,0
Очень тонкий	до 0,7

Содержание в песке отмучиваемых **пылевидных** и **глинистых частиц** $P_{ОТМ}$ в процентах по массе вычисляют по формуле:

$$P_{ОТМ} = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100, \quad (5.30)$$

где m – масса высушенной навески до отмучивания, г;
 m_1 – масса высушенной навески после отмучивания, г.

5.4.6 Добавки к бетонной смеси

Добавки для регулирования *реологических свойств* бетонных смесей:

1) **пластифицирующие добавки** – увеличивают подвижность (или снижают жесткость) бетонных смесей без снижения прочности бетона;

суперпластификаторы – полимерные материалы, вводимые в количестве 0,2–1,2 % от массы цемента; увеличивают осадку конуса *ОК* с 2–4 см до 20 см и более; суперпластификаторы обладают сильным разжижающим эффектом и не замедляют твердение бетона; применяются для стабилизации бетонной смеси (предупреждение расслоения) и для водоудержания (уменьшение водоотделения);

сильно пластифицирующие добавки (осадка конуса *ОК* до 14–19 см);

средне пластифицирующие добавки (осадка конуса *ОК* 9–13 см);

слабо пластифицирующие добавки (осадка конуса *ОК* менее 8 см);

2) **гидрофильно-пластифицирующие добавки** (лигносульфонаты технические *ЛСТ* в количестве 0,1–0,5 % от массы цемента.); применяют для бетонов с большим содержанием вяжущего; позволяют улучшить удобоукладываемость бетонной смеси при сохранении расхода цемента и прочности бетона; обеспечивают уменьшение расход воды и цемента на 8–10 % при сохранении прежней удобоукладываемости и прочности бетона;

3) **гидрофобно-пластифицирующие добавки** (мылонафт, гидрофобизирующие кремнийорганические жидкости *ГКЖ-10, ГКЖ-11*), которые рекомендуется применять для бетонов с малым расходом цемента; гидрофобно-пластифицирующие добавки, адсорбируясь в порах отвержденного бетона, придают бетону водоотталкивающие свойства (гидрофобизируют бетон); в результате уменьшается водопоглощение, возрастает морозостойкость и сопротивляемость бетона к коррозии.

Ускорители твердения бетонных смесей – хлорид кальция $CaCl_2$, сульфат натрия Na_2SO_4 , поташ K_2CO_3 , нитрит кальция $Ca(NO_3)_2$ и натрия $NaNO_3$ вводят в количестве 1–3 % от массы цемента; действие ускорителей объясняется тем, что они понижают растворимость $Ca(OH)_2$, выделяющегося при гидратации цемента, что приводит к увеличению гидратации клинкерных материалов; прочность бетона в первые 3–7 сут твердения значительно больше, чем без добавки; одна и та же добавка при различной дозировке может проявлять разное действие, т. е. ускорять или замедлять твердение бетона; добавки хлористых солей $CaCl_2$ и $NaCl$ в больших количествах вызывают коррозию арматуры, поэтому их количество ограничивают до 2 %.

Замедлители твердения бетонных смесей – добавки, уменьшающие одновременно водопотребность бетонных смесей и расход цемента, а также пластифицирующие бетонные смеси (*ЛСТ, ГКЖ-10, ГКЖ-11*).

Противоморозные добавки обеспечивают наличие жидкой фазы воды при температуре ниже 0 °С; чем больше концентрация раствора соли, тем ниже температура замерзания раствора; добавки хлористых солей $CaCl_2$ и $NaCl$ в больших количествах вызывают коррозию арматуры, поэтому их количество ограничивают до нормируемого уровня.

Добавки, **регулирующие структуру** бетона:

1) **воздухововлекающие** добавки (смола древесная омыленная *СДО*, смола нейтрализованная воздухововлекающая *СНВ*) – поверхностно-активные вещества, которые уменьшают поверхностное натяжение воды, что при перемешивании способствует вовлечению в бетонную смесь пузырьков воздуха;

2) **газообразующие** добавки (полигидросилоксаны, алюминиевая пудра);

3) **пенообразующие** добавки (сульфанол, гидролизат протеина).

Специальные добавки придают бетону *специфические свойства* (технический углерод – электропроводный бетон, барий – радиационно-защитный бетон и др.).

5.4.7 Свойства бетонной смеси

По физическому состоянию бетонная смесь занимает промежуточное положение между жидкостями и твердыми телами. Характеризуясь как *пластично-вязкоупругое тело*, бетонная смесь обладает упругостью и прочностью структуры. Реологическая модель бетонной смеси приведена на рисунке 5.10.

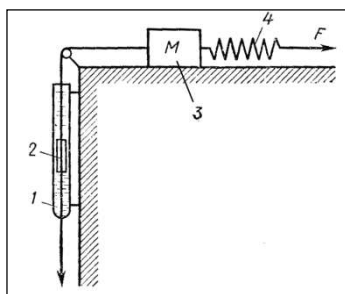


Рисунок 5.10 – Реологическая модель бетонной смеси:

1 – поршень; 2 – цилиндр с маслом;
3 – массивное тело на плоскости; 4 – упругий элемент.

При внешнем механическом воздействии (силы тяжести, давления, вибрации) бетонная смесь приобретает свойства вязкой жидкости. Способность коллоидных дисперсных систем (вяжущее тесто) разжижаться при механическом воздействии и вновь загустевать в спокойном состоянии, называется *тиксоотропией*. Структура бетонной смеси до и после виброуплотнения приведена на рисунке 5.11.

Для оценки реологических свойств бетонной смеси используют специальные технические характеристики – *удобоукладываемость* и *связность*.

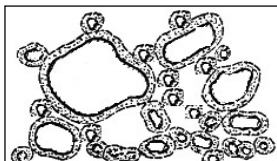
Удобоукладываемость – способность бетонной смеси заполнять форму, образуя плотную однородную массу.

Удобоукладываемость характеризуется показателями *подвижности ОК* или *жесткости Ж*.

Подвижность характеризует удобоукладываемость пластичных бетонных смеси и определяется по *осадке стандартного конуса ОК*.

Осадка конуса ОК – это разность высот стандартного металлического конуса (30 см) и осевшей под собственным весом бетонной смеси. Измеряется в см (рисунок 5.12).

а)



б)

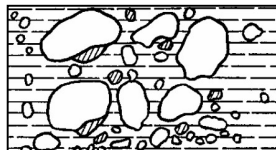
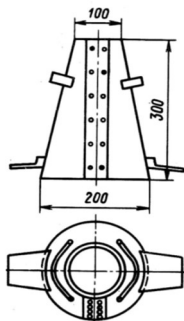


Рисунок 5.11 – Структура бетонной смеси (по Ю. Сторку)

а – рыхло насыпанная в форму бетонная смесь;

б – бетонная смесь после виброуплотнения

а)



б)

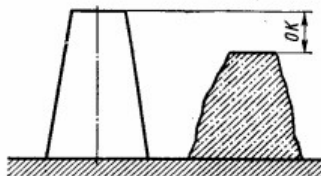


Рисунок 5.12 – Определение осадки конуса OK подвижной смеси

a – форма стандартного конуса; b – определение величины OK

Жесткость бетонной смеси $Ж$ – это *продолжительность вибровоздействия в секундах*, при котором бетонная смесь, разжижаясь, приобретает свойство жидкости и занимает соответствующий ей объем.

Жесткость характеризует удобоукладываемость жестких бетонных смесей, для которых $OK=0$.

Жесткость определяется по стандартной методике на лабораторной виброплощадке с применением стандартного металлического конуса (рисунок 5.13).

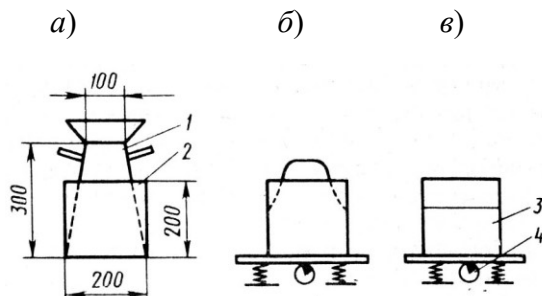


Рисунок 5.13 – Определение жесткости $Ж$ жесткой бетонной смеси

a – начало испытания: 1 – форма конуса; 2 – форма; b – процесс испытания; $в$ – окончание испытания: 3 – бетонная смесь; 4 – устройство для вибровоздействия

Таблица 5.12 – Марка по удобоукладываемости

Марка по удобоукладываемости	Норма удобоукладываемости по показателю	
	жесткости, с	подвижности, см
$Ж4$	31 и более	–
$Ж3$	21–30	–
$Ж2$	11–20	–
$Ж1$	5–10	–
$П1$	1–4	4 и менее

<i>П2</i>	—	5–9
<i>П3</i>	—	10–15
<i>П4</i>	—	16 и более

Подвижные смеси *П1–П4* имеют вид связной и подвижной массы и содержат такое количество воды, которое позволяет им хорошо уплотняться при вибрации. Подвижные смеси *П3* и *П4* называют *литыми*, их можно укладывать без значительных механических усилий.

Жесткие смеси *Ж1–Ж4* имеют вид густой пастообразной массы, содержат малое количество воды и для их укладки требуется значительное механическое уплотнение (вибрация с пригрузом).

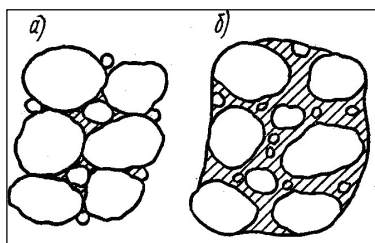


Рисунок 5.14 – Структура бетонной смеси (по В. Г. Скрамтаеву)

а – жесткая смесь; *б* – подвижная смесь

Нерасслаиваемость (связность) – способность бетонной смеси подвергаться внешним механическим воздействиям (при транспортировке, укладке, уплотнении) без потери однородности (*гомогенности*). Расслоение бетонной смеси возникает, когда составляющие частицы под воздействием силы гравитации перемещаются в бетонной смеси: тяжелый заполнитель перемещается вниз, а часть воды поднимается вверх (рисунок 5.15). Явление оседания частиц бетонной смеси носит название **седиментации**.

Нерасслаиваемость бетонной смеси повышается:

- 1) при правильном назначении количества воды и применении пластификаторов;
- 2) при правильном подборе состава бетона;
- 3) при правильном режиме вибромеханических воздействий.

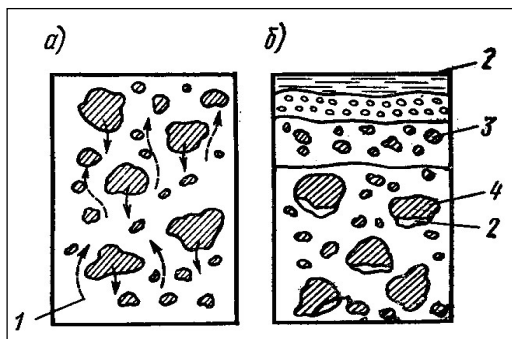


Рисунок 5.15 – Схема расслоения бетонной смеси

а – в процессе уплотнения; б – после уплотнения:

1 – направление, по которому отжимается вода; 2 – вода; 3 – мелкий заполнитель; 4 – крупный заполнитель

Факторы, влияющие на удобоукладываемость:

1) **количество воды** в бетонной смеси – чем больше воды, тем меньше *вязкость* цементного теста и больше *подвижность* бетонной смеси; однако превышение количества воды, сверх необходимого, может приводить к *расслоению* бетонной смеси; количество воды, необходимое для получения *нерасслаиваемой* бетонной смеси проектной *удобоукладываемости* в зависимости от вида и характеристик заполнителей, определяют по *нормативно-технической документации*;

2) **вид и качество заполнителей** – применение щебня вместо гравия, при прочих равных условиях, снижает *удобоукладываемость* бетонной смеси за счет большей *водопотребности* щебня, имеющего более развитую поверхность и

большую суммарную площадь смачивания; уменьшение крупности заполнителей, увеличение открытой пористости и шероховатости повышает *водопотребность* заполнителя и снижает *удобоукладываемость* бетонной смеси; наличие примесей пылеватых и глинистых частиц снижает *удобоукладываемость*, так как с уменьшением частиц заполнителя возрастает *водопотребность* за счет увеличения суммарной площади смачивания;

3) *вид цемента* – пластифицированный и гидрофобный портландцемент с малой *водопотребностью* характеризуются большей *удобоукладываемостью* при прочих равных условиях;

4) *объем цементного теста* в бетонной смеси – цементное тесто в бетонной смеси играет роль вязкой жидкости, в которую погружены все составляющие бетонной смеси; для получения *связной* системы все пустоты между частицами заполнителя (мелкого и крупного) должны быть заполнены вяжущим тестом, а поверхность твердых частиц (заполнителей, глинистых и пылеватых) должна быть покрыта слоем вяжущего теста; чем больше объем цементного теста превышает *межзерновую пустотность* заполнителя, тем выше *удобоукладываемость* бетонной смеси, вследствие облегчения перемещение твердых частиц смеси относительно друг друга;

5) наличие *пластифицирующих добавок* – введение пластифицирующих добавок в количестве 0,05–0,3 % от массы вяжущего наиболее эффективный способ повышения *удобоукладываемости*; пластифицирующие добавки снижают расход воды для достижения проектной *удобоукладываемости* и увеличивают *плотность* и *прочность* бетона.

5.4.8 Свойства бетона

СТАНДАРТНЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНА

Средняя плотность тяжелого бетона – 2100–2500 кг/м³.

Прочность бетона – важнейший показатель качества конструктивных бетонов.

Предел прочности при сжатии в проектном возрасте определяют испытанием на одноосное сжатие стандартных образцов-кубов (кубиковая прочность).

Статистической характеристикой однородности свойств бетона является **коэффициент вариации** v , который равен отношению среднего квадратичного отклонения отдельных результатов испытаний прочности к его средней прочности.

Чем меньше значение **коэффициента вариации**, тем более однороден бетон:

при $v = 6\%$ – однородность хорошая;

при $v = 13\%$ – однородность удовлетворительная;

при $v = 16\%$ – значения недопустимы.

Класс бетона – это стандартная числовая характеристика прочности бетона, принимаемая с *гарантированной обеспеченностью вероятности* (обычно 0,95). Это значит, что установленное классом свойство обеспечивается не менее чем в 95 случаях из 100. Например, **класс бетона В20** следует понимать так: с вероятностью 0,95 при определении **предела прочности при сжатии** на любом произвольно взятом участке конструкции будет получен результат 20 МПа и более, и лишь в 5 % случаев можно ожидать значения менее 20 МПа.

Марка бетона по прочности $R_{сж}$ – числовая характеристика прочности, определенная по стандартной методике и принимаемая по среднему значению, т. е. без учета коэффициента вариации.

Ползучесть – это способность бетона к увеличению необратимой **деформации** под действием постоянной нагрузки какого-либо вида (сжатия, растяжения, изгиба). Эти деформации

затухают только через несколько лет эксплуатации. *Ползучесть* уменьшается с уменьшением расхода цемента и *В/Ц* отношения.

Ползучесть бетона вызывает релаксацию бетона, что, с одной стороны, может играть положительную роль (снижение *внутренних напряжений* в конструкциях) или отрицательную (потеря напряжения в арматуре в предварительно напряженных конструкциях).

Сцепление с арматурой – свойство бетона, обеспечивающее возможность его совместной работы со стальной арматурой в железобетонных конструкциях (прочность сцепления со стальной арматурой составляет 15–20 % от предела прочности бетона). Равновесная воздушная **гигроскопическая влажность** для тяжелых бетонов составляет до 2–3 %, для легких до 7–8 %.

Водопоглощение бетона достигает до 4–8 % по массе.

Водопроницаемость бетона характеризуется **маркой по водонепроницаемости** *W*, которая выражает максимальное давление, при котором еще не наблюдается фильтрация воды через стандартный образец. Например, **марку по водонепроницаемости** *W7* следует понимать так: максимальное давление, при котором еще не наблюдается фильтрация воды через стандартный образец, равно 7 атм.

Усадка и набухание – способность бетона к изменению объема, обусловленная преимущественно изменением его влажностного содержания. Влажностные деформации тяжелого бетона приведены в таблице 5.16.

Таблица 5.16 – Влажностные деформации тяжелого бетона

Вид заполнителя	Усадка на воздухе, мм/м	Набухание в воде, мм/м
Щебень из гранита	0,37	0,131
Щебень из известняка	0,39	0,5
Щебень из песчаника	0,75	0,055
Гравий	0,79	0,074

Общая усадка складывается из влажностной усадки (испарение влаги из капилляров и из цементного геля), карбонизационной усадки (уменьшение объема цементного камня вследствие перехода Ca(OH)_2 в CaCO_3 под воздействием углекислоты воздуха), *контракционной* усадки (уменьшение абсолютного объема *цементного камня* при твердении системы цемент–вода, что составляет 10 % от влажностной усадки).

Теплопроводность – способность бетона проводить тепло через свое тело.

Теплопроводность уменьшается с уменьшением *средней плотности* бетона за счет увеличения *пористости*.

Для тяжелого бетона коэффициент теплопроводности составляет до 1,3–1,7 Вт/(м·°С), для легких бетонов – до 0,2–0,7 Вт/(м·°С). *Влажность* бетона увеличивает его *теплопроводность*, так как в порах бетона *коэффициент теплопроводности* воды – 0,58 Вт/(м·°С) значительно больше, чем воздуха – 0,023 Вт/(м·°С).

Коэффициент линейного температурного расширения – способность бетона увеличивать свои линейные размеры при нагревании.

В воздушно-сухом состоянии *коэффициент линейного температурного расширения* бетона – $(10\text{--}12) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что близко к *коэффициенту температурного расширения* стали – $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Это нужно учитывать при проектировании *большепролетных железобетонных конструкций*. Например, увеличение длины Δl стального прогона или железобетонной балки длиной 100 м при изменении температуры от $(-50) \text{ } ^\circ\text{C}$ до $(+50) \text{ } ^\circ\text{C}$ составит:

$$\Delta l = k_{\text{лтр}} \cdot l \cdot \Delta T = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 100 = 12 \cdot 10^{-2} \text{ (м)} = 12 \text{ (см)} \quad (5.31)$$

Близость коэффициентов позволяет армировать бетон *стальной арматурой* без опасности возникновения *внутренних*

напряжений при колебаниях температуры в процессе эксплуатации железобетона.

Морозостойкость – способность насыщенных водой бетонных образцов выдерживать циклическое замораживание и оттаивание без потери массы и прочности.

Характеризуется **маркой по морозостойкости F** , которая выражает количество циклов замораживания и оттаивания насыщенных водой бетонных образцов без потери массы и прочности.

В зависимости от морозостойкости тяжелый бетон подразделяют на **классы: $F50, F75, F100, F150, F200, F300, F400, F500, F600, F800, F1000$** . Фрагмент микроструктуры бетона показан на рисунке 5.16, а изменение прочности бетона после испытания на морозостойкость, показано на рисунке 5.17.

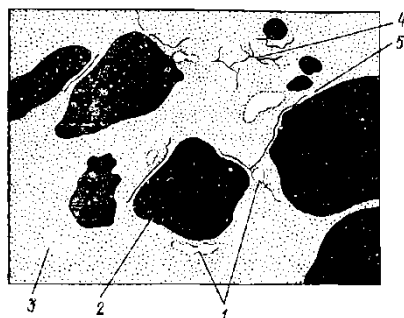


Рисунок 5.16 – Фрагмент микроструктуры бетона

1 – воздушные поры; 2 – заполнитель; 3 – цементный камень;
4, 5 – усадочные трещины в цементном камне

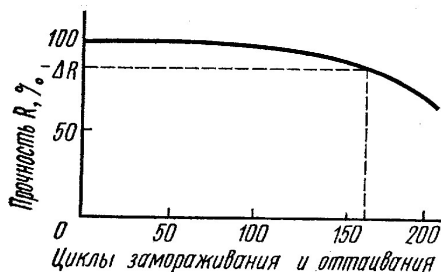


Рисунок 5.17 – Изменение прочности бетона при попеременном замораживании и оттаивании

5.4.9 Расчет состава тяжелого бетона

Расчет состава бетона заключается в определении такого рационального отношения между материалами, которое обеспечивает получение проектной *прочности* бетона, заданную *удобоукладываемость* бетонной смеси, а также наибольшую *экономичность* состава бетонной смеси, т.е. получение ее с наименьшим расходом цемента на 1 м³ бетона.

В результате подбора получают расход каждого компонента на 1 м³ бетонной смеси. Состав бетона может быть также выражен в виде соотношения между массами или объемами цемента, песка и щебня (количество цемента при этом принимается за единицу) с обязательным указанием значения V/C , т. е. отношения массы воды к массе цемента в свежеприготовленной цементной смеси.

Исходными данными при подборе состава бетона являются:

- заданная **марка** бетона;
- заданная **удобоукладываемость** бетонной смеси;
- стандартные свойства** используемых материалов (вяжущего, мелкого и крупного заполнителей).

При этом необходимо знать следующие показатели:

для цемента – вид портландцемента, его активность и истинную и насыпную плотности;

для песка – истинную плотность, насыпную плотность и влажность;

для щебня (гравия) – истинную, среднюю и насыпную плотность, предельную крупность зерен и влажность.

Для подбора состава бетонной смеси предложено несколько методов. Одним из них является **метод расчета по абсолютным объемам**, разработанный В. Г. Скрамтаевым, в основу которого положено условие, что расчетный *состав бетонной смеси* должен быть *абсолютно плотным* (без пор и пустот).

ПРАВИЛА ПОДБОРА НОМИНАЛЬНОГО СОСТАВА БЕТОНА

Подбор номинального состава бетона производят по следующим этапам:

- 1) выбор и определение характеристик исходных материалов для бетона;
- 2) расчет начального состава;
- 3) изготовление пробных замесов начального и рабочих составов;
- 4) корректировка рабочих составов бетона;
- 5) назначение номинального состава бетона, обеспечивающего получение бетонной смеси и бетона требуемого качества при минимальном расходе вяжущего.

Выбор материалов, применяемых для изготовления бетона, следует производить на основе их *паспортных характеристик* с учетом условий среды эксплуатации.

Материалы, применяемые для подбора состава, должны соответствовать требованиям *стандартов* или *технических условий* на эти материалы.

Активность цемента определяется стандартными методами. Допускается активность цемента для расчета состава бетона принимать равной его гарантированной *марке*.

Начальный состав бетона рассчитывают по фактическим характеристикам исходных материалов.

В качестве варьируемых параметров состава принимают параметры, оказывающие влияние на свойства бетонной смеси и нормируемые показатели качества бетона в зависимости от вида бетона и принятой методики расчета. Например, для тяжелого бетона в общем случае это цементно-водное отношение, доля песка в смеси заполнителей и расход добавки.

Для каждого вида бетона устанавливают основной параметр, в большей мере влияющий на его прочность (например, для тяжелого бетона – цементно-водное отношение).

Опытные замесы по начальному и дополнительным составам следует готовить на заполнителях и вяжущем, характеристики которых были приняты при расчете составов.

Приготовление опытных замесов начинают с перемешивания сухих материалов, а затем постепенно добавляют в замес назначенное по расчету количество воды, раствора добавки или синтетической смолы.

Допускается на основе визуального контроля *удобоукладываемости* и *структуры* бетонной смеси вносить изменения в количество отдозированной воды.

Если свойства бетонной смеси не соответствуют каким-либо требованиям *задания* на подбор состава бетона, следует произвести корректировку составов до получения в замесе каждого состава смеси с заданными свойствами.

Бетонную смесь, которая не удовлетворяет требованиям *задания* по *удобоукладываемости*, допускается корректировать при вторичном перемешивании с добавлением воды, цемента, заполнителей и добавок в необходимых количествах.

После получения бетонной смеси с заданными свойствами определяют ее *плотность* и для каждого состава рассчитывают фактический *расход материалов* на 1 м³ бетонной смеси.

Режим *твердения* образцов должен соответствовать принятому режиму твердения бетона в конструкциях, для которых произведен подбор состава бетона.

ПОРЯДОК РАСЧЕТА ПО МЕТОДУ АБСОЛЮТНЫХ ОБЪЕМОВ

ЭТАП 1 – ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ВОДЫ *B*

Ориентировочный расход воды *B* на 1 м³ (1000 л) бетонной смеси заданной *удобоукладываемости* (подвижности или жесткости) находят по специальным графикам или таблицам (таблица 5.17).

Таблица 5.17 – Ориентировочные значения расхода воды *B*

Удобоукладываемость бетонной смеси		Расход воды, кг/м ³ , при <i>наибольшей крупности</i> заполнителя, мм					
		гравия			щебня		
<i>ОК</i> , см	<i>Ж</i> , с	10	20	40	10	20	40
0	31	150	135	125	160	145	135
0	30–20	160	145	130	170	155	145
0	20–11	165	150	135	175	160	150
0	10–5	175	160	145	185	170	155
1–2	–	185	170	155	195	180	165
3–4	–	195	180	165	205	190	175
5–6	–	200	185	170	210	195	180
7–8	–	205	190	175	215	200	185
9–10	–	215	200	185	225	210	195

ЭТАП 2 – ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕМЕНТНО-ВОДНОГО ОТНОШЕНИЯ

Для определения цементно-водного отношения *Ц/В* используются эмпирические формулы следующего вида:

а) для бетонов с $C/B \leq 2,5$ ($B/C \geq 0,4$)

$$R_B = A \cdot R_{II} \left(\frac{II}{B} - 0,5 \right); \quad (5.32)$$

б) для бетонов с $II/B > 2,5$ ($B/II < 0,4$)

$$R_B = A_1 \cdot R_{II} \left(\frac{II}{B} + 0,5 \right), \quad (5.33)$$

где R_B – предел прочности бетона при сжатии в возрасте 28 сут нормального твердения;

R_{II} – марка применяемого портландцемента, кгс/см²;

A и A_1 – коэффициенты, учитывающие качество заполнителей бетонной смеси (таблица 5.18).

Таблица 5.18 – Значения коэффициентов A и A_1 в зависимости от качества

Характеристика заполнителей	A	A_1
Высококачественные – чистые фракционированные заполнители из плотных и прочных горных пород	0,65	0,43
Рядовые – заполнители среднего качества, в том числе гравий	0,6	0,4
Пониженного качества – крупный заполнитель низкой прочности, например щебень из карбонатных пород, мелкий песок	0,55	0,37

ЭТАП 3 – ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ЦЕМЕНТА II

Зная величину цементно-водного отношения $\frac{II}{B}$ и расход воды B (см. Этап 1) определяют расход цемента II в кг на 1 м³ бетонной смеси по формуле:

$$II = \left(\frac{II}{B} \right) B. \quad (5.34)$$

Если расчетный расход цемента получился ниже минимально допустимого значения по нормам, необходимо повысить его до нормативного.

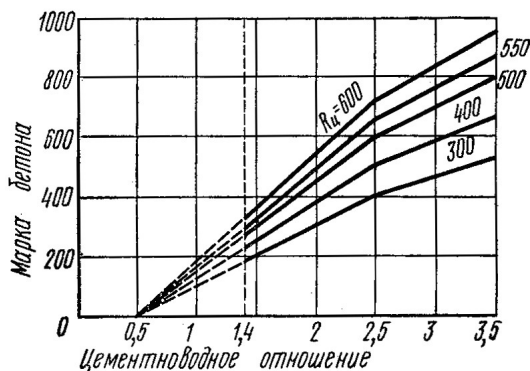


Рисунок 5.18 – Зависимость марки тяжелого бетона от Ц/В при различных марках цемента

ЭТАП 4 – ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА КРУПНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ Π И МЕЛКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ Π

Расчет крупного и мелкого заполнителя определяют, исходя из следующих положений:

а) объем плотно уложенного бетона, принимаемый в расчете равным 1000 л, складывается из абсолютного объема мелкого V_{Π} и крупного V_{Π} заполнителей и абсолютного объема цементного теста ($V_{\Pi} + V_B$), заполняющего пустоты между зернами заполнителей:

$$V_{\Pi} + V_B + V_{\Pi} + V_{\Pi} = \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + \frac{B}{\rho_B} + \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} = 1000, \quad (5.35)$$

где $V_{\Pi}, V_B, V_{\Pi}, V_{\Pi}$ – абсолютные объемы соответственно, цемента, воды, песка и щебня, л;

Π, B, Π, Π – расход соответственно цемента, воды, песка и щебня на 1000 л бетонной смеси, кг;