

Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин

# СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



**УДК 691**  
**ББК 38.3**  
**Д24**

**Рецензенты:** доктор технических наук, профессор *Калашников В.И.* (Пензенский государственный университет архитектуры и строительства); доктор технических наук, профессор *Плугин А.А.* (Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г. Харьков).

**Дворкин Л.И., Дворкин О.Л.**

Д 24 Строительное материаловедение. – М.: Инфра-Инженерия, 2013. – 832 с.

ISBN 978-5-9729-0064-0

В учебно-практическом пособии приведены научные основы строительного материаловедения и характеристика основных материалов, применяемых в современном строительстве.

Освещаются теоретические представления о структуре и составе строительных материалов, процессах структурообразования и механизме синтеза важнейших свойств. Рассматриваются пути их прогнозирования и регулирования свойств строительных материалов.

Последовательно излагаются строительно-техническая характеристика материалов и изделий, основные нормативные требования к ним, способы их получения и модифицирования.

Книга предназначена для студентов и аспирантов строительных университетов и факультетов, а также инженерно-технических работников строительных организаций.

© Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., авторы, 2013  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2013

ISBN 978-5-9729-0064-0

## СОДЕРЖАНИЕ

---

<b>Предисловие</b> . . . . .	<b>6</b>
<b>Введение</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>ЧАСТЬ I. ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИА- ЛОВЕДИЯ</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>1. Классификация и стандартизация строительных материалов</b> . . . . .	<b>14</b>
1.1 Основные понятия и классификация строительных материалов . . . . .	14
1.2 Стандартизация и оценка качества материалов . . . . .	20
1.3 Строительные материалы как стохастические объекты ..	25
<b>2. Структура строительных материалов</b> . . . . .	<b>29</b>
2.1 Атомно-молекулярная структура материалов. . . . .	29
2.2 Наноструктура материалов . . . . .	45
2.3 Микроструктура материалов . . . . .	52
2.4 Макроструктура материалов . . . . .	59
<b>3. Общие свойства строительных материалов</b> . . . . .	<b>65</b>
3.1 Механические свойства . . . . .	65
3.2 Физические свойства . . . . .	85
3.3 Химические свойства . . . . .	111
<b>4. Обоснование составов и технологических параметров получения строительных материалов</b> . . . . .	<b>114</b>
4.1 Термодинамический метод и диаграммы состояния . .	114
4.2. Моделирование в исследованиях строительных материа- лов . . . . .	124
<b>5. Физико-химические и технологические процессы по- лучения строительных материалов</b> . . . . .	<b>138</b>
5.1 Физико-химические процессы . . . . .	138
5.2 Основные технологические процессы . . . . .	147
<b>ЧАСТЬ II. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ СТРОИ- ТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> . . . . .	<b>175</b>
<b>6. Природные каменные материалы</b> . . . . .	<b>175</b>
6.1. Виды и свойства минералов . . . . .	176

6.2. Горные породы . . . . .	184
6.3. Свойства горных пород и виды природных каменных материалов . . . . .	200
6.4. Долговечность природных каменных материалов . . . . .	215
<b>7. Керамические материалы . . . . .</b>	<b>218</b>
7.1. Составы керамических масс . . . . .	218
7.2. Процессы обжига и спекания . . . . .	226
7.3. Структура и свойства керамических материалов . . . . .	230
7.4. Основные виды строительных керамических материалов . . . . .	239
<b>8. Стекло и стеклокристаллические материалы . . . . .</b>	<b>265</b>
8.1. Силикатные расплавы и стеклообразное состояние . . . . .	265
8.2. Виды стекол. Свойства строительного стекла . . . . .	269
8.3. Строительные изделия из стекла . . . . .	283
8.4. Волокнистые материалы из силикатных расплавов . . . . .	302
8.5. Стеклокристаллические материалы . . . . .	309
<b>9. Металлические материалы. . . . .</b>	<b>315</b>
9.1. Структура металлов и сплавов . . . . .	316
9.2. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов . . . . .	322
9.3. Углеродистые и легированные стали . . . . .	326
9.4. Термическая обработка стали . . . . .	344
9.5. Чугуны . . . . .	351
9.6. Сплавы цветных металлов. . . . .	355
9.7. Коррозия металлов. . . . .	360
<b>10. Минеральные вяжущие вещества . . . . .</b>	<b>364</b>
10.1. Гипсовые вяжущие материалы. . . . .	364
10.2. Строительная известь и известесодержащие вяжущие . . . . .	377
10.3. Жидкое стекло. Магнезиальные и фосфатные вяжущие . . . . .	387
10.4. Шлаковые вяжущие . . . . .	397
10.5. Портландцемент . . . . .	404
10.6. Разновидности цементов. . . . .	432
<b>11. Композиционные материалы на основе вяжущих веществ. . . . .</b>	<b>457</b>

11.1. Бетоны . . . . .	457
11.2. Разновидности бетонов . . . . .	518
11.3. Армированные композиционные материалы . . . . .	544
11.4. Материалы на основе нецементных вяжущих . . . . .	568
11.5. Строительные растворы. . . . .	586
11.6. Сухие строительные смеси. . . . .	604
<b>12. Материалы на основе древесины . . . . .</b>	<b>612</b>
12.1. Строение и свойства древесины. . . . .	612
12.2. Лесо- и пиломатериалы. Изделия из древесины . . . . .	629
12.3. Материалы из клееной древесины. . . . .	639
12.4. Материалы на основе измельченной древесины . . . . .	648
<b>13. Битумные и дегтевые вяжущие. Материалы на их основе. . . . .</b>	<b>668</b>
13.1. Битумные вяжущие. . . . .	668
13.2. Дегтевые и композиционные вяжущие. Эмульсии и пасты. . . . .	680
13.3. Асфальтовые материалы. . . . .	687
13.4. Рулонные кровельные и гидроизоляционные материалы	706
<b>14. Полимерные материалы. . . . .</b>	<b>715</b>
14.1. Синтетические полимеры. . . . .	716
14.2. Состав и свойства пластмасс. . . . .	739
14.3. Основные виды строительных полимерных материалов .	753
14.4. Полимерные клеи, мастики и бетоны. . . . .	778
<b>15. Лакокрасочные и оклеечные материалы. . . . .</b>	<b>793</b>
15.1. Классификация и свойства. . . . .	793
15.2. Характеристика основных компонентов. . . . .	797
15.3. Основные виды красок и лаков. . . . .	803
15.4. Оклеечные материалы . . . . .	810
<b>Литература. . . . .</b>	<b>814</b>
<b>Предметный указатель. . . . .</b>	<b>816</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Строительное материаловедение является составной частью строительной науки, на которой базируется современная строительная технология. Ее теоретическим фундаментом является комплекс фундаментальных наук, изучающих строение и свойства материальных объектов.

В системе профессиональной подготовки специалистов-строителей “Строительное материаловедение” является базовой научной дисциплиной, без овладения которой невозможно дальнейшее изучение других специальных дисциплин. В учебных планах подготовки специалистов-строителей в последние годы “Строительное материаловедение” заменило близкий, но не идентичный традиционный курс “Строительные материалы”. В отличие от последнего в нем строительно-технологическая характеристика отдельных материалов увязывается с общими закономерностями, характеризующими влияние структуры и состава материалов на их свойства. Разработке такого курса способствовали обстоятельные теоретические исследования, выполненные в различных странах с помощью современных физико-химических методов.

Стремясь удовлетворить неуклонно возрастающие требования строительной практики, наука о строительных материалах динамично развивается, обогащается новыми экспериментальными данными и результатами внедрения передовых технологий.

Данная книга является в значительной мере результатом многолетней научно-педагогической и научно-исследовательской работы авторов. Авторы благодарны рецензентам, замечания которых учтены при подготовке книги к изданию. Они будут благодарны также всем читателям за замечания, направленные на улучшение содержания книги при ее возможном переиздании в будущем.

# ЧАСТЬ I. ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

---

## 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К *строительным материалам* (от лат. *materia* – вещество) относят вещества и смеси веществ, имеющие свойства, позволяющие их использовать при строительстве зданий и сооружений. В строительстве применяют чрезвычайно большое количество материалов, которое интенсивно увеличивается с каждым годом. Функциональное соответствие материалов, их надежность, технологичность, экологическая безопасность обеспечиваются при достаточном соответствии определенных качественных показателей требованиям государственных стандартов, технических условий и других действующих нормативных документов.

### 1.1 Основные понятия и классификация строительных материалов

Свойства строительных материалов определяются их составом и структурой.

Состав материалов характеризуется содержанием отдельных химических соединений (*химический состав*), минералов (*минералогический состав*), частей или фаз однородных по химическому составу и физическим свойствам, ограниченных поверхностью раздела (*фазовый состав*) и количеством отдельных компонентов – веществ, образующих данный материал (*вещественный состав*).

Большинство строительных материалов относятся к гетерогенным *дисперсным системам*, состоящим из двух или более фаз. В дисперсных системах одно или несколько веществ (дисперсная фаза) являются частичками или порами, распределенными в окружающей дисперсной среде. Дисперсные системы разделяют на грубодисперсные и тонкодисперсные. Последние называют также коллоидными системами. В грубодисперсных системах частицы имеют размеры от 1 мкм и выше, их удельная поверхность не более 1 м<sup>2</sup>/г, в коллоидных от – 1 нм до 1 мкм, удельная поверхность может достигать сотен м<sup>2</sup>/г.

В строительных материалах, которые принадлежат к дисперсным системам, дисперсную фазу наиболее часто составляют твердые частички. Это разнообразные порошки, суспензии, пасты, пластично-вязкие смеси, вяжущие вещества, пластмассы, лакокрасочные соединения, керамические массы, растворы и бетонные смеси, расплавы стекловидных веществ и т.п. В некоторых материалах дисперсная фаза может быть жидкой (полимерные эмульсии) или газообразной (пористые горные породы, ячеистые бетоны, пеностекло, пенопласты и т.п.).

*Структура* материалов характеризует особенности их строения в т.ч. размещения в пространстве отдельных фаз и компонентов, характер связей между ними.

Единой классификации строительных материалов не разработано, существует много классификационных признаков и между отдельными группами материалов существует сложная структура связей.

Классификационные признаки строительных материалов разделяют на физические, химические, физико-химические, механические, структурные, технологические и функциональные.

По происхождению строительные материалы разделяют на природные и искусственные. Природные материалы получают из природного сырья путем механической обработки без изменения их химического состава и структуры.

За исключением природных камней и древесины, строительные материалы – это искусственные продукты, в основе получения которых лежат химико-технологические процессы. Искусственные материалы по составу и свойствам могут существенно отличаться от природного сырья.

Распространенной является классификация строительных материалов по назначению. Н.А. Попов предложил разделять строительные материалы по назначению на две группы: материалы универсального типа, пригодные для несущих конструкций, и материалы специального назначения. В первую группу входят природные и искусственные каменные материалы, металлы, конструкционные пластмассы и лесные материалы, во вторую – теплоизоляционные, акустические, гидроизоляционные, кровельные, герметизирующие, отделочные, антикоррозионные и огнеупорные материалы.



*Материалы для несущих конструкций* подбирают с учетом особенностей конструктивных элементов и технико-экономических обоснований. С этой целью широко используют стальной и алюминевый прокат, бетон и железобетон, кирпич, клееную древесину и т.п.

*Материалы для ограждающих конструкций* являются самонесущими и не подвергаются влиянию больших нагрузок. Наружные ограждающие конструкции могут воспринимать снежные и ветровые нагрузки, а также подвергаться агрессивному воздействию окружающей среды. Материалы, занимающие конструктивное пространство между несущими элементами, должны быть легкими и иметь низкую теплопроводность.

*Отделочные материалы* придают поверхностям конструкций зданий и сооружений защитные и декоративные свойства. Различают отделочные и отделочно-монтажные материалы. Первые применяют для устройства защитно-декоративных покрытий на поверхности конструкций (штукатурка, лаки, краски, обои), другие объединяют как отделочные, так и конструктивные функции при устройстве покрытий (стеклоблоки, профильное стекло, древесностружечные и древесноволокнистые плиты, асбестоцементные и алюминиевые изделия).

Функциональное назначение *теплоизоляционных материалов* состоит в уменьшении потерь теплоты при эксплуатации зданий и сооружений, а также тепловых агрегатов и трубопроводов. Конструкционно-теплоизоляционные материалы используют для самонесущих конструкций зданий и малоэтажных несущих конструкций (ячеистые бетоны, арболит, фибролит и т.п.).

К теплоизоляционным материалам по структуре близки *акустические материалы*, которые предназначены для снижения энергии звуковых колебаний (уровня шума). Их разделяют на звукопоглощающие и звукоизоляционные.

Для защиты строительных конструкций зданий и сооружений от воздействия воды и водных растворов агрессивных веществ применяют *гидроизоляционные материалы*. В зависимости от назначения такие материалы разделяют на антифильтрационные, антикоррозионные и герметизирующие.

Верхним водозащитным слоем в конструкции кровель является кровельное покрытие. Некоторые материалы (рулонные, мастики)

можно использовать как для кровель, так и для гидроизоляции, а другие (асбестоцементные листы, черепица, кровельная сталь) – только для кровель.

К строительным материалам относят также *санитарно-технические изделия* – ванны, раковины, мойки, приборы для отопления кухонь, оборудование санузлов.

К отдельной группе можно отнести *строительные материалы специального назначения* – дорожные, жаростойкие, кислотостойкие, электротехнические, трубопроводные и др.

Развернутая классификационная система для искусственных строительных материалов предложена И.А. Рыбьевым. В ее основу положено выделение трех типов материалов: 1) твердеющих при обычных температурах; 2) в условиях автоклавов, т.е. при повышенных температурах и давлений пара; 3) при остывании огненножидких расплавов, выполняющих функцию вяжущих веществ. В пределах каждого типа искусственные материалы группируют в зависимости от вида вяжущих веществ. В материалах безобжигового типа цементирующая часть представлена неорганическими, органическими и комплексными вяжущими, обжигового – керамическими, стеклянными, шлаковыми и др. расплавами. В материалах автоклавного типа типичными являются вяжущие преимущественно автоклавного твердения. Данная классификационная схема является, как отмечает и сам ее автор, неполной и условной, не всегда позволяющей провести четкую границу между отдельными типами и группами материалов.

В строительном материаловедении наибольшее распространение получила смешанная система классификации строительных материалов, в которой учитывается комплекс различных признаков – состав сырья и готовых продуктов, их структура и назначение.

Строительные материалы большей частью относятся к композиционным материалам (композитам). *Композиционными* называют естественные или искусственные гетерогенные материалы, общим признаком которых является наличие поверхности раздела между компонентами (фазами), которые их образуют. В композиционном строительном материале (КСМ) различают первую фазу, или матрицу – непрерывный связующий компонент, находящийся в твердом кристаллическом или аморфном состоянии, и вторую фазу –

## 1. Классификация и стандартизация строительных материалов

---

вещество или несколько веществ, диспергированных в матрице, которые могут находиться в любом агрегатном состоянии.

В качестве второй фазы КСМ служат тонкодисперсные порошкообразные или волокнистые материалы различной природы, являющиеся упрочняющими или армирующими компонентами. Порошкообразные или зернистые наполнители (заполнители), особенно часто вводимые в строительные композиты, улучшая ряд их свойств, способствуют также уменьшению расхода связующего компонента и удешевлению материалов.

Матрица обеспечивает монолитность композитов, фиксирует форму изделий, распределяет действующие напряжения по объему материала. Материал матрицы определяет метод изготовления изделий, возможность выполнения конструкций с заданными параметрами.

По назначению КСМ разделяют на силовые, несилловые и специальные. Силовые КСМ (стеклопластики, асбестоцемент, бетоны и др.) должны иметь соответствующие механические свойства, позволяющие воспринимать значительные нагрузки. К несилвым КСМ, не предназначенным для восприятия значительных нагрузок, относятся, например, теплоизоляционные материалы на основе разных волокон (фибrolит, минераловатные плиты и др.), пено- и газобетоны, пеностекло, пенопластики.

КСМ специального назначения могут работать в условиях высоких температур (жаростойкие, огнестойкие), химической агрессии (щелоче- и кислотостойкие), электрического напряжения (электроизоляционные, электропроводные). К ним относятся также звуко- и теплоизоляционные, декоративные, безусадочные, расширяющиеся и другие КСМ.

По материалу матрицы КСМ разделяют на цементные, гипсовые, керамические, металлические и др. Наполнители достаточно разнообразны. В табл. 1.1 приведены примеры КСМ с применением волокнистых и слоистых наполнителей, использованных в качестве упрочняющих компонентов. Армирование КСМ волокнами может быть как ориентированное (железобетон, стеклоцемент, стеклопластики), так и дисперсное (фибробетон).

Примеры армированных КСМ

Матрица	Армирующий компонент	Строительный материал
<b>Стеклянные и керамические материалы</b>		
Стекло	металлическая сетка полимерная пленка кристаллические включения	армированное стекло триплекс (многослойное стекло) ситаллы, шлакоситаллы
Обожженная глина	каолиновые, муллитовые, корундовые, углеродные волокна	огнеупорные и специальные керамические материалы
<b>Материалы на основе неорганических вяжущих веществ</b>		
Неорганические гидравлические вяжущие вещества	стальная, базальтовая, полимерная фибра металлическая арматура асбест древесное волокно и дробленка	фибробетоны железобетон асбестоцемент арболит, фибролит
Гипсовые вяжущие вещества магнезиальные вяжущие	картон бумажная макулатура древесная стружка древесные опилки	гипсокартонные листы гипсоволокнистые листы гипсостружечные плиты ксилолит
<b>Материалы на основе древесины</b>		
Полимерные вяжущие вещества	шпон стружка волокна	фанера, клееная древесина древесностружечные плиты древесноволокнистые плиты
<b>Битумные, дегтевые и полимерные материалы</b>		
Битум и битумно-полимерные вяжущие вещества деготь полимерные вяжущие	картон, фольга, стекловолокно, асбест  картон стеклянное волокно тканые и нетканые материалы	рубероид, фольгоизол, стеклорубероид, гидроизол  толь стеклопластик линолеум, ковровые покрытия и др.

Особенно распространены КСМ с зернистыми наполнителями (бетоны, растворы, мастики). При малом содержании наполнителя (заполнителя) свойства КСМ определяются в основном свойствами

## 1. Классификация и стандартизация строительных материалов

---

матрицы, а в случае роста содержания наполнителя их свойства могут существенно изменяться, приобретая специфические признаки, которые свойственны только данному виду КСМ. Например, для цементных бетонов увеличение содержания наполнителя до определенного предела способствует увеличению прочности на 20-30%, асфальтовых – на 50-80%.

Разновидностью композиционных материалов являются *искусственные строительные конгломераты (ИСК)*. По И.А. Рыбьеву искусственными строительными конгломератами называют материалы, в которых заполнитель цементируется вяжущими веществами или первичными связями (химическими, электрическими, металлическими и др.) в монолит. К естественным конгломератам относятся горные породы, к искусственным – прежде всего различные бетоны и растворы. В классификации ИСК предложено выделить два типа таких материалов – безобжиговые, которые образуются в результате низкотемпературных физико-химических процессов твердения вяжущих веществ, и обжиговые, образуемые при охлаждении из расплавов или контактном спекании.

*Сырьевыми компонентами* строительных материалов могут быть твердые, жидкие и газообразные вещества. Большая часть твердого сырья представлена горными породами, древесиной и промышленными отходами (шлаки, золы, отсевы и т.д.). Жидкими сырьевыми материалами являются нефтепродукты, жидкие отходы химических предприятий, водные растворы. Перерабатывая нефть и каменный уголь, получают газообразные продукты, которые можно использовать для производства полимерных материалов.

Из неорганических сырьевых материалов наиболее распространены силикаты, преобладающие (66,5%) в составе земной коры. К минеральному сырью многоцелевого назначения относятся глина, карбонатные породы, пески, и др.

### 1.2. Стандартизация и оценка качества материалов

Основные требования к качеству материалов и изделий массового применения устанавливаются Государственными стандартами (ГОСТ), отраслевыми стандартами (ОСТ), стандартами предприятий (СТП), техническими условиями (ТУ). В этих нормативных документах могут содержаться термины и определения, краткое

описание материалов и способы их изготовления, требования к качеству, правила транспортирования, приемки и хранения, а также методы испытаний.

Наряду с национальными в российской системе стандартизации находят применение стандарты ИСО – Международной организации по стандартизации.

Указания о применении строительных материалов и требования к их свойствам приведены также в строительных нормах и правилах (СНиП), где регламентируются основные положения строительного проектирования и производства.

Нормативные требования к ведущим свойствам материалов, определяющим их применение, выражены в виде *марок* или *классов*. Марка вычисляется обычно как среднее арифметическое результатов испытаний определенного числа образцов, класс является численной характеристикой определенного свойства материала, принимаемой с гарантированной обеспеченностью, т.е. с учетом его возможного разброса, измеряемого статистическими показателями.

Методической основой стандартизации размеров при проектировании и изготовлении строительных изделий является Модульная координация размеров в строительстве (МКРС), позволяющая унифицировать число типоразмеров и обеспечить взаимозаменяемость изделий из разных материалов. Основным модуль (М) принимают равным 100 мм. Размеры объемно-планируемых параметров зданий и сооружений (ширину пролетов, шаг колоны, рам) и крупных строительных изделий (стеновых панелей, блоков, плит) назначают кратными укрупненным модулям (2 м, 3 м, 6 м, 12 м, 30 м, 60 м). Для назначения относительно малых размеров конструктивных элементов и деталей наряду с основным используют дробные модули, мм: 1 (1/100 м), 2 (1/50 м), 5 (1/20 м), 10 (1/10 м), 20 (1/5 м), 50 (1/2 м).

*Качество* материалов характеризует степень их соответствия требованиям потребителя. Используются разнообразные методы определения показателей качества: *инструментальный* – измерение свойств приборами; *органолептический* – оценка свойств анализом ощущений человека, сравнением исследуемых материалов с эталоном; *экспертный*, основанный на оценках опытных специалистов – экспертов; *социологический*, основанный на анализе оценок потребителей продукции; *расчетный* – расчет показателей качества

в зависимости от параметров его состава и структуры с учетом особенностей технологического процесса.

Наиболее широко применяются инструментальные методы оценки качества материалов, имеющие сложившуюся научную базу. Инструментальные методы базируются на *метрологии* – науке об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Результаты всех измерений содержат погрешности, вызванные несовершенством приборов и методов, непостоянством условий наблюдений, недостаточным опытом наблюдателя или особенностями его органов чувств. *Систематические погрешности* в процессе последовательных измерений остаются постоянными (рис. 1.1) или изменяются по определенному закону. Например, при определении марки цемента систематическую ошибку вносит использование пластинок с шероховатой поверхностью. Такую ошибку можно устранить путем подшлифовки и дополнительной закалки пластинок. Систематические погрешности в случае невозможности их устранения могут быть изучены и учтены в виде поправок. В отличие от систематических *случайные погрешности* при повторных измерениях одной и той же величины принимают различные значения. Их нельзя исключить из результатов измерений, их изучают и учитывают, обрабатывая результаты повторных опытов с использованием математической статистики и теории вероятности.

Погрешности, значительно превышающие объективно допустимые (промахи), возникают по ряду причин и оцениваются с помощью статистических критериев.

Значения измеряемых величин в зависимости от способа получения делят на четыре вида: прямые, косвенные, совместные и совокупные.

*Прямые* измерения заключаются в экспериментальном сравнении измеряемой величины с ее мерой или в отсчете показаний прибора, дающего значение измеряемой величины

*Косвенные* измерения получают на основе прямых, связанных с измеряемой величиной известными зависимостями (плотность – масса единицы объема, предел прочности – отношение разрушающего усилия к площади поперечного сечения образца и т.д.).

*Совместными* называют одновременно производимые измерения двух или нескольких неоднородных величин для нахождения

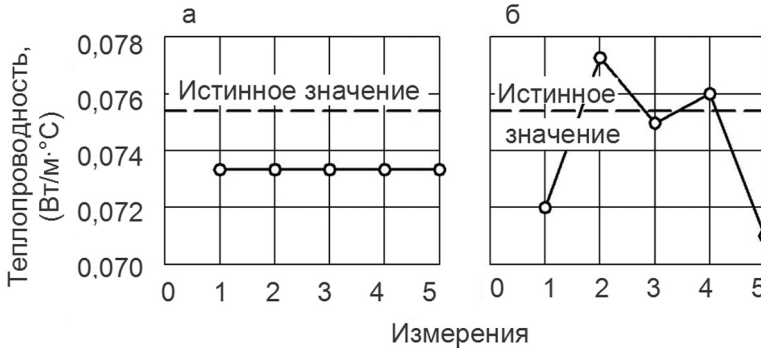
зависимости между ними. При этом значения измеряемых величин находят по данным повторных прямых или косвенных измерений. Так, для определения модуля упругости бетона измеряют напряжения в бетоне при различных значениях относительной деформации ( $\epsilon$ ). При напряжении, например, равном 0,2 предела прочности R начальный модуль упругости вычисляют по формуле:

$$E_H = 0,2R / \epsilon. \quad (1.1)$$

При определении температурного расширения также надо выполнить совместные измерения температуры  $t$  и рассчитать соответствующие значения относительного удлинения  $\epsilon_t$ . Для расчета  $\epsilon_t$  необходимо с помощью системы уравнений рассчитать коэффициенты в формуле:

$$\epsilon_t = at + bt^2 + \dots \quad (1.2)$$

В отличие от совместных *совокупные* измерения проводятся для нескольких одноименных величин.



**Рис. 1.1.** Пример погрешностей измерений:  
а – систематическая; б – случайная

Для промышленной продукции методы и средства измерений всех основных свойств, характеризующих качество изделий, стандартизируются. Применительно к строительным материалам стандартизованы методы и средства измерений параметров состояния и характеристики структуры, физических, механических и химических свойств.

*Уровень качества продукции* оценивается системой показателей назначения, надежности и долговечности, технологичности, эргономики, стандартизации и унификации, экономичности и др.



## 1. Классификация и стандартизация строительных материалов

---

*Показатели назначения* характеризуют полезный эффект от использования материалов по назначению и область их применения. К ним относятся преимущественно технические свойства материалов, показатели их состава и структуры, транспортабельность и т.д.

*Показатели надежности* характеризуют стабильность свойств материалов в заданных границах, обеспечивающих их нормальную эксплуатацию (работоспособность).

Состояние, при котором материал полностью или частично утрачивает работоспособность, называют *отказом*. Под безотказностью понимают способность материалов сохранять работоспособность при определенных условиях в течение определенного времени без ремонта. Способность материалов сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами на ремонт характеризуется *долговечностью*. Долговечность измеряют сроком службы материалов. На практике часто понятия надежности и долговечности отождествляют.

*Показатели технологичности* характеризуют способность материалов перерабатываться в изделия и конструкции. К таким показателям принадлежат формуемость, свариваемость и др.

*Эргономические показатели* качества объединяют гигиеничность, антропометрические, психологические и ряд других показателей в системе “человек-среда-изделие”.

*Технико-экономические показатели* характеризуют затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию материалов. К ним относятся также материалоемкость продукции, которая определяется отношением количества или стоимости затраченных на ее производство материальных ресурсов к объему, энерго-, трудо-, металлогоемкость и др.

Классификация показателей качества условна: один и тот же показатель может принадлежать к разным группам и подгруппам. По совокупности показателей определяют сорта, классы, группы, марки и другие качественные градации материалов.

При оценке уровня качества материалов используют дифференцированный, комплексный и смешанный методы. При *дифференцированном* методе показатели качества материалов сравнивают с базовыми показателями, приведенными в стандартах. Например, если при требуемой (базовой) средней прочности бетона 20 МПа удалось обеспечить (без перерасхода ресурсов) прочность 25 МПа,

то уровень качества бетона по прочности  $25/20=1,25$ . Аналогично рассчитывают и относительные показатели качества по другим нормированным свойствам.

Если уровень качества необходимо охарактеризовать одним обобщенным показателем, применяют *комплексный* метод. В этом случае используют интегральные показатели качества, например, полезный эффект (Э) на 1 руб. затрат:

$$\text{Э} = \text{П}_\Sigma / (\text{З}_\Pi + \text{З}_\Pi), \quad (1.3)$$

где  $\text{П}_\Sigma$  – суммарный полезный эффект, руб.;  $\text{З}_\Pi$  – затраты на получение материала, руб.;  $\text{З}_\Pi$  – затраты на использование материала, руб.

Если можно установить коэффициент значимости  $m_i$  для каждого отдельного показателя  $q_i$  в системе показателей, то комплексную оценку можно выполнить методом определения *средневзвешенного интегрального* показателя Q:

$$Q = \sum_{i=1}^n m_i q_i, \quad (1.4)$$

где  $q_i = P_i/P_{i,б}$  – относительный показатель качества по i-му признаку;  $P_i$  – показатель качества для данного материала;  $P_{i,б}$  – базовый (эталонный) показатель качества.

### 1.3. Строительные материалы как стохастические объекты

Современные строительные материалы – сложные гетерогенные системы, характеризующиеся множеством как внутренних, так и внешних связей на микро- и макроуровнях, формирующих их структуру и свойства.

В зависимости от степени неопределенности все связи можно разделить на детерминированные и вероятностные или стохастические. Первые являются строго обусловленными и предсказуемыми. Например, зная плотность вещества, из которого состоит материал (истинная плотность) и плотность материала (средняя плотность), можно точно рассчитать его общую пористость, зная количество шарообразных зерен и распределение их по диаметрам, можно определить удельную поверхность смеси.

Вместе с тем большинство связей и, как следствие, качественных показателей материалов являются *стохастическими*, т.е. характеризуются с определенной вероятностью, и соответственно, имею-

## 1. Классификация и стандартизация строительных материалов

---

щими некоторую неопределенность. К наиболее характерным стохастическим связям можно отнести связи между параметрами состава или структуры материала и их свойствами, параметрами воздействия внешней среды и реакциями материалов на них. Стохастичность таких связей обусловлена:

- неоднородностями и дефектами структуры материалов, начиная от атомно-молекулярного уровня слагающих их веществ, до макроуровня, характеризуемого пространственным расположением и взаимодействием основных фаз;
- сложным, часто разнонаправленным влиянием многих факторов, их изменчивостью, процессами “жизнедеятельности” материала во времени (тепло- и массообмен, физико-химические изменения, деформация).

Поведение всех стохастических систем, в том числе и строительных материалов на всех этапах их технологии и эксплуатации можно прогнозировать в заданных условиях с некоторой вероятностью в соответствии с закономерностями, имеющими статистический характер. По мере углубления теоретических представлений о механизмах структурообразования и “синтезе свойств” материалов, закономерностях их функционирования в конкретной среде точность и надежность предсказаний, связанных с поведением материалов, увеличивается, хотя вероятностный их характер остается. Стохастические закономерности в определенных физических и химических системах служат базисом для разработки новых материалов с заданными свойствами.

Вероятностный характер основных оценок и выводов при исследовании строительных материалов обуславливает необходимость широкого использования методологии статистического анализа. Она включает экспериментальное определение закона распределения изучаемого параметра, необходимое для выбора статистического метода решения задачи, расчет числовых характеристик распределения, установку их доверительных границ.

При экспериментальном определении свойств строительных материалов кривые распределения приближаются по характеру, как правило, к нормальной кривой Гаусса (рис. 1.2), которая соответствует равной вероятности появления как положительных, так и отрицательных отклонений от центра. Для характеристики определенной выборки эксперимента, включающей  $n$  наблюдений, используют средние величины – среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонение.

*Среднее арифметическое:*

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1.5)$$

где  $\sum_{i=1}^n x_i$  – сумма измеренных величин;  $n$  – число наблюдений.

*Среднее квадратическое отклонение* (стандарт) показывает пределы изменчивости изучаемого параметра, т.е. степень разброса отдельных его значений относительно среднего:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (1.6)$$

Среднее квадратическое отклонение является квадратным корнем *дисперсии*  $\sigma$ .

Если дисперсия и среднее квадратическое отклонение характеризуют абсолютную изменчивость свойства, то для выражения относительной изменчивости служит *коэффициент вариации*:

$$\varepsilon_v = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (1.7)$$

Этот коэффициент широко используется в технологии строительных материалов, характеризуя уровень технологической дисциплины при выпуске продукции, надежность контролируемых параметров.

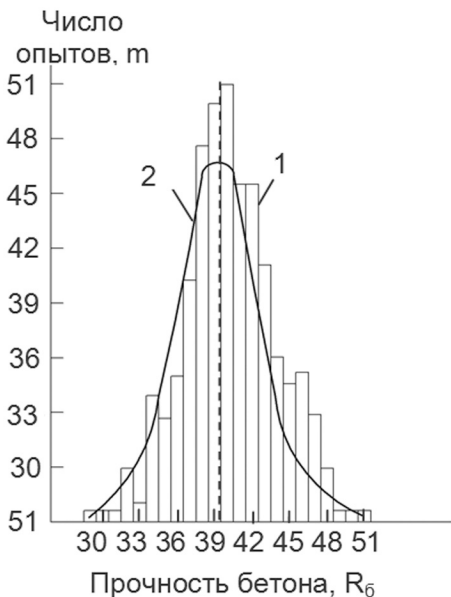
Для того чтобы по среднему арифметическому данной ограниченной выборки судить более точно о средней величине измеряемого свойства, находят *среднюю ошибку* среднего арифметического:

$$m = \pm \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (1.8)$$

Отношение величины средней ошибки к величине среднего арифметического называется *показателем точности*:

$$\varepsilon = \pm \frac{m}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (1.9)$$

Статистическая обработка результатов испытания, кроме определения изменчивости измеряемого показателя качества и точности исследования, предполагает оценку *доверительной вероятности*  $1 - p$  или *уровня значимости*  $p$  полученного результата.



**Рис. 1.2.** Гистограмма (1) и кривая нормального распределения (2)

дится исследование, и ответственности выводов, вытекающих из него.

Число наблюдений, необходимых для получения достаточно надежных и достоверных результатов:

$$n = \frac{c_v^2 t^2}{\varepsilon^2}, \quad (1.10)$$

где  $t$  – критерий Стьюдента, который находится при соответствующих доверительной вероятности и числе степеней свободы по справочным данным.

К актуальным в строительном материаловедении задачам, решаемым с применением статистических методов, можно отнести определение объема экспериментальных данных, необходимых для репрезентативных оценок, сравнение результатов нескольких групп испытаний, определение метрологических характеристик экспериментов и др.

Уровнем значимости называют количество (или процент) таких маловероятных случаев, в которых исследователь рискует ошибиться, признав полученный результат правильным. Количество или процент достоверных (не вызывающих сомнений) значений изучаемого свойства называют доверительной вероятностью. Обычно в исследовательской практике изучения строительных материалов принимают два порога доверительной вероятности: 0,95; 0,99 и соответствующие им уровни значимости: 0,05 (5%) и 0,01 (1%). Величина доверительной вероятности или уровень значимости устанавливается в зависимости от степени точности, с какой проводится исследование, и ответственности выводов, вытекающих из него.

## 2. СТРУКТУРА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Под *структурой* материалов понимают их строение, которое определяется взаимным расположением, формой и размерами структурных элементов. Структурными элементами могут быть атомы, ионы, молекулы, твердые частицы (зерна) разной дисперсности, агрегаты частиц, поры, пустоты между частицами, заполненные жидкой или газообразной фазой.

Структуру материалов, ее общие признаки и особенности можно рассматривать на разных уровнях в зависимости от размеров структурных элементов (1). Выделяют четыре уровня структуры строительных материалов:

атомно-молекулярный	$(l < 10^{-9} \text{ м});$
наноструктурный	$(l = 10^{-9} - 10^{-7} \text{ м});$
микроскопический	$(l = 10^{-7} - 10^{-4} \text{ м});$
макроскопический	$(l > 10^{-4} \text{ м}).$

### 2.1. Атомно-молекулярная структура материалов

Большинство строительных материалов относятся к твердым телам, которые могут иметь кристаллическое или аморфное строение. Кристаллические материалы в отличие от аморфных характеризуются упорядоченным расположением частиц в пространстве, образующих кристаллическую решетку.

Рассматривая структуру материала на атомно-молекулярном уровне изучают: для кристаллических материалов – особенности строения элементарных ячеек, а для аморфных – особенности агрегатов молекул, атомов или ионов, не образующих упорядоченных решеток.

К *кристаллическим* материалам относится большая группа естественных или искусственных материалов, имеющих преимущественно полиминеральный состав. Ряд материалов (например, цементы, полимеры, шлаки) содержат как кристаллические, так и аморфные компоненты.

Кристаллическое состояние тела является наиболее устойчивым, поскольку энергия материала при этом минимальная. Энергию кристаллической решетки сложных по составу веществ можно оценить,

## 2. Структура строительных материалов

представляя их химическую формулу в виде нейтральных групп и рассчитав энергию каждой группы отдельно. Например, представив химическую формулу минерала анортита  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ , входящего в доменные шлаки и другие материалы в виде  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , энергию его кристаллической решетки ( $U$ ) можно вычислить как сумму энергий более простых веществ:

$$U = U_{\text{CaO}} + U_{\text{Al}_2\text{O}_3} + U_{2\text{SiO}_2}.$$

Энергия ионной кристаллической решетки по А.Е. Ферсману равна сумме энергий отдельных ионов, которые ее составляют. Энергетическую характеристику, или константу ионов (ЭК) определяют по формуле:

$$\text{ЭК} = \frac{W_u^2}{2l_u}, \quad (2.1)$$

где  $W_u$  – валентность иона;  $l_u$  – расстояние между центрами ионов.

Ниже приведены значения ЭК для некоторых ионов:

Ион	ЭК	Ион	ЭК	Ион	ЭК
$\text{Ba}^{2+}$	1,35	$\text{Al}^{3+}$	4,85	$\text{OH}^-$	0,37
$\text{Ca}^{2+}$	1,75	$\text{Fe}^{3+}$	5,15	$\text{CrO}_4^{2-}$	0,75
$\text{Fe}^{2+}$	2,12	$\text{Ti}^{3+}$	8,40	$\text{O}^{2-}$	1,55
$\text{Mg}^{2+}$	2,10	$\text{Si}^{3+}$	8,60	$\text{SiO}_4^{4-}$	2,75
$\text{Cl}^{2+}$	4,75	$\text{H}^+$	0,32		

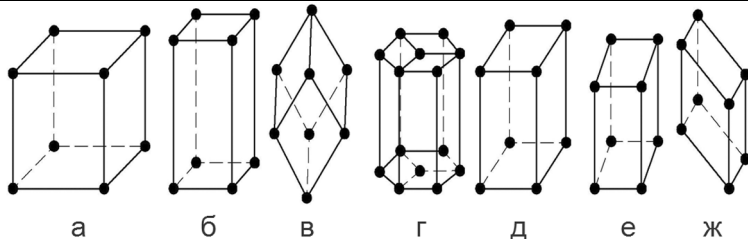
Суммарную энергию кристаллической решетки  $U$ , не содержащей сильно поляризующих или поляризованных ионов, можно выразить формулой А.Ф. Капустинского:

$$U = 256,1 \frac{\sum_n W_k W_a}{l_k + l_a}, \quad (2.2)$$

где  $n$  – количество ионов;  $W_k, W_a$  – валентности соответственно катионов и анионов;  $l_k, l_a$  – расстояния между центрами ионов.

Элементарные ячейки кристаллов разделяют на примитивные и сложные. В примитивных ячейках атомы или ионы размещены в вершинах элементарного параллелепипеда. Примитивные элементарные ячейки в зависимости от длины кристаллографических осей и величины углов между ними разделяют на семь типов (табл. 2.1, рис. 2.1).

В сложных элементарных ячейках на середине ребер или граней размещены дополнительные ионы (атомы).



**Рис. 2.1.** Формы элементарных примитивных ячеек кристаллов:  
 а – кубическая; б – тетрагональная; в – тригональная (ромбоэдрическая); г – гексагональная; д – ромбическая;  
 е – моноклинная; ж – триклинная

Теорию построения пространственных решеток кристаллов основал Е.С. Федоров в 1890 г. Он установил 230 вариантов комбинаций в пространстве элементов симметрии пространственных решеток или пространственных групп.

Таблица 2.1

Типы примитивных элементарных ячеек

Тип решетки	Угол между осями	Соотношение размеров осей
Триклинная	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 900$	$a \neq b \neq c$
Моноклинная	$\alpha = \beta = 900 \neq \gamma$	$a \neq b \neq c$
Ромбическая	$\alpha = \beta = \gamma = 900$	$a \neq b \neq c$
Кубическая	$\alpha = \beta = \gamma = 900$	$a = b = c$
Ромбоэдрическая	$\alpha = \beta = \gamma \neq 900$	$a = b \neq c$
Гексагональная	$\alpha = \beta = 900 \gamma = 1200$	$a = b \neq c$
Тетрагональная	$\alpha = \beta = \gamma = 900$	$a = b \neq c$

Минералы, которые входят в состав строительных материалов, образуют определенные типы кристаллических решеток, установление параметров которых – один из главных путей их идентификации. Ниже, в качестве примера, приведены типы кристаллических решеток минералов цементного клинкера:

Минерал  
 Трехкальциевый силикат  
 $\beta$ -двукальциевый силикат

Решетка  
 Триклинная  
 Ромбическая

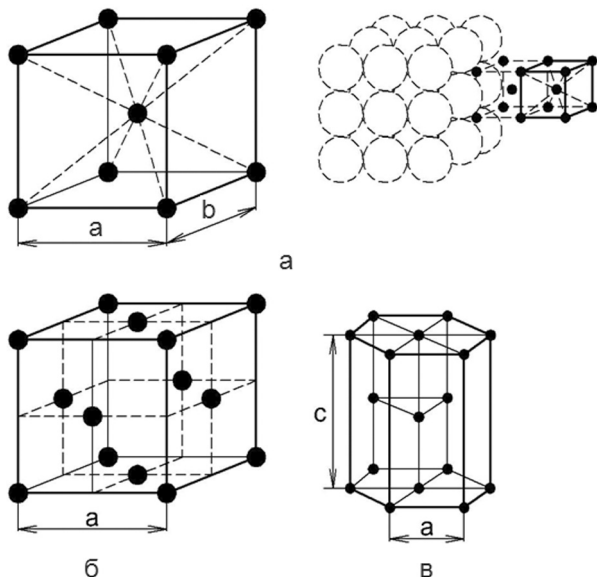


## 2. Структура строительных материалов

Трехкальциевый алюминат  
Четырехкальциевый алюмоферрит  
Двухкальциевый феррит

Кубическая  
Ромбическая  
Моноклинная

Большинство минералов образует одну из высокосимметричных решеток с плотной упаковкой атомов: кубическую объемноцентрированную, кубическую гранецентрированную и гексагональную (рис. 2.2). Расстояния  $a$ ,  $b$ ,  $c$  между центрами соседних атомов в элементарной ячейке называются периодами решетки и измеряются в нанометрах ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ).

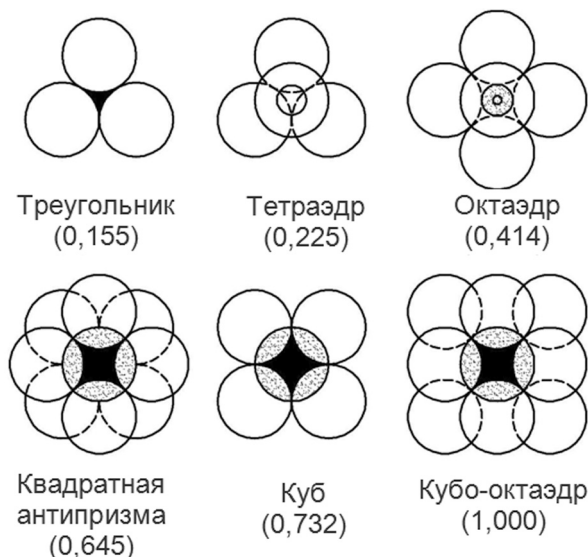


**Рис. 2.2.** Кристаллические решетки металлов:

а – объемно-центрированная кубическая;  
б – гранецентрированная кубическая; в – гексагональная

Плотность кристаллической решетки характеризуется *координационным числом*  $K$ , под которым понимают количество атомов, ближайшее к данному атому (рис. 2.3). Например, в элементарной ячейке объемноцентрированной кубической решетки наименьшее расстояние между атомами  $l_a = 0,5\sqrt{3}$ . На этом расстоянии от данно-

го атома находится восемь других. Координационное число такой решетки составляет 8.



**Рис. 2.3.** Некоторые группировки анионов вокруг катиона (для каждого случая указано минимальное соотношение радиусов катион:анион)

Наиболее плотные решетки – гексагонального и гранецентрированного типа с координационным числом 12, коэффициентом компактности 74% (отношение объема атомов к объему ячейки).

Половину наименьшего расстояния между атомами или ионами в кристаллической решетке называют *атомным (ионным) радиусом*. С возрастанием координационного числа атомный радиус уменьшается, поскольку увеличивается расстояние между атомами.

Если в кристаллической решетке есть атомы (ионы) разных элементов, то отношение их координационных чисел равно обратному отношению числа элементов в химической формуле вещества. Например, решетка  $\text{SiO}_2$  имеет координационные числа 4 для  $\text{Si}^{4+}$  и 2 для  $\text{O}^{2-}$ . Отношение этих чисел составляет 2:1, то есть равно обратному отношению числа элементов. Наиболее устойчивое состояние кристаллической структуры вещества достигается, если катион контактирует со всеми анионами, которые его