

Л. И. ДВОРКИН



**СТРУКТУРА, СОСТАВ
И СВОЙСТВА МИНЕРАЛЬНЫХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**



«Инфра-Инженерия»

УДК 691.2/.7
ББК 38.31/.34+38.38
Д24

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *Мишутин А. В.*
(Одесская государственная академия строительства и архитектуры);
доктор технических наук, профессор *Лаповская С. Д.*
(Научно-исследовательский институт строительных материалов и изделий,
г. Киев)

Д24 **Дворкин, Л. И.** Структура, состав и свойства минеральных строительных материалов : учебное пособие. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 424 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0361-0

Рассмотрены основные минеральные строительные материалы, показаны пути формирования и регулирования их физико-механических свойств при изменении структуры и состава. Даны основные методы назначения составов строительных материалов с необходимыми свойствами, способы получения и модифицирования их качественных параметров.

Для студентов и аспирантов строительных специальностей, а также инженерно-технических работников строительных организаций и предприятий по изготовлению строительных материалов.

УДК 691.2/.7
ББК 38.31/.34+38.38

ISBN 978-5-9729-0361-0 © Дворкин Л. И., 2020
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ	7

ГЛАВА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	12
§ 1.1 Основные понятия и классификация строительных материалов	12
§ 1.2. Стандартизация и оценка качества материалов.....	18
§ 1.3. Строительные материалы как стохастические объекты	23

ГЛАВА 2. СТРУКТУРА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ..	27
§ 2.1. Атомно-молекулярная структура материалов	27
§ 2.2. Наноструктура материалов.....	43
§ 2.3. Микроструктура материалов	51
§ 2.4. Макроструктура материалов	58

ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	64
§ 3.1. Термодинамический метод и диаграммы состояния	64
§ 3.2. Моделирование в исследованиях строительных материалов	74

ГЛАВА 4. ОБЩИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПОЛУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	96
§ 4.1 Физико-химические процессы	96
§ 4.2. Основные технологические процессы.....	104

ГЛАВА 5. ОБЩИЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	133
§ 5.1. Механические свойства	133
§ 5.2. Физические свойства.....	154
§ 5.3. Химические свойства	181

ГЛАВА 6. ПРИРОДНЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	185
§ 6.1. Виды и свойства минералов	185
§ 6.2. Горные породы	193
§ 6.3. Основные свойства горных пород	197
ГЛАВА 7. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	204
§ 7.1. Составы керамических масс	204
§ 7.2. Процессы обжига и спекания	212
§ 7.3. Структура и свойства керамических материалов	216
ГЛАВА 8. СТЕКЛО И СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	227
§ 8.1. Силикатные расплавы и стеклообразное состояние	227
§ 8.2. Виды стекол. Свойства строительного стекла	231
§ 8.3. Стеклокристаллические материалы	248
ГЛАВА 9. МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ МАТЕРИАЛЫ	253
§ 9.1. Классификация вяжущих материалов	253
§ 9.2 Гипсовые вяжущие	255
§ 9.3. Строительная известь	273
§ 9.4. Портландцемент	293
ГЛАВА 10. ЦЕМЕНТНЫЕ БЕТОНЫ	320
§ 10.1. Структура бетона	321
§ 10.2. Прочность бетона	323
§ 10.3. Деформативные свойства	338
§ 10.4. Стойкость бетона к температурно-влажностным воздействиям. Коррозионная стойкость	346
§ 10.5. Проектирование составов бетона с заданными свойствами	363
ГЛАВА 11. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	378
§ 11.1. Структура металлов и сплавов	378
§ 11.2. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов	384
§ 11.3. Углеродистые и легированные стали	388
§ 11.4. Термическая обработка стали	400
§ 11.5. Чугуны	407

§ 11.6. Сплавы цветных металлов	410
§ 11.7. Коррозия метал лов	415
Литература	429

ГЛАВА 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 *дисперсионной 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 $1 \text{ м}^2/\text{г}$, в коллоидных от 1 нм до 1 мкм, удельная поверхность может достигать сотен $\text{м}^2/\text{г}$.

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 очень 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 обос-

нований. С этой целью широко используют стальной и алюминиевый 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, кислотоустойкие, 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 – 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, несиловые и специальные. Силовые КСМ (стеклопластики, асбестоцемент, бетоны и др.) должны иметь соответствующие механические свойства, позволяющие воспринимать значительные нагрузки. К несиловым 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).

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

Т а б л и ц а 1.1

Примеры армированных КСМ

Матрица	Армирующий компонент	Строительный материал
Стекланные и керамические материалы		
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
Материалы на основе неорганических вяжущих веществ		
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
Материалы на основе древесины		
Полимерные вяжущие вещества	шпон стружка волокна	фанера, клееная древесина древесностружечные плиты древесноволокнистые плиты
Битумные, дегтевые и полимерные материалы		
Битум и битумно-полимерные вяжущие вещества деготь	картон, фольга, стекловолокно, асбест	рубероид, фольгоизол, стеклорубероид, гидроизол
полимерные вяжущие	картон стеклянное волокно тканые и нетканые материалы	толь стеклопластик линолеум, ковровые покрытия и др.

Разновидностью композиционных материалов являются *искусственные строительные конгломераты (ИСК)*. По И. А. Рыбеву

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. Основной 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; 3; 6; 12; 30; 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. 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 (ε). При напряжении, например, равном 0,2 предела прочности R начальный модуль упругости вычисляют по формуле:

$$E_n = 0,2R / \varepsilon. \quad (1.1)$$

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

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

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

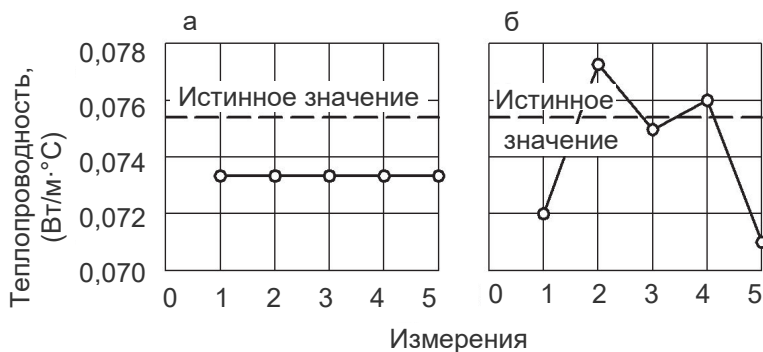


Рис. 1.1. Пример погрешностей измерений:
а – систематическая; б – случайная

Для промышленной продукции методы и средства измерений всех основных свойств, характеризующих качество изделий, стандартизуются. 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.

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-, металлоемкость 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:

$$\mathcal{E} = P_{\Sigma} / (Z_n + Z_u), \quad (1.3.)$$

где P_{Σ} – суммарный полезный эффект, руб.;
 Z_n – затраты на получение материала, руб.;
 Z_u – 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 *средне-взвешенного интегрального* показателя Q :

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

где $q_i = P_i / P_{i.6}$ – относительный показатель качества по i -му признаку;
 P_i – показатель качества для данного материала;
 $P_{i.6}$ – 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, имеющими 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, деструкция).

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.

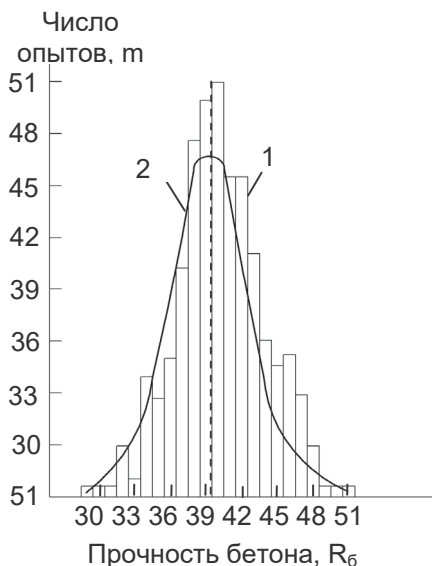


Рис. 1.2. Гистограмма (1) и кривая нормального распределения (2)

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

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

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*:

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

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

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.

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.