МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Брянский государственный инженерно-технологический университет»
(БГИТУ)

**Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин, Е.Ю. Горностаева,
С.В. Васюнина, Е.Г. Карпиков**

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Часть 1

Учебное пособие

Курск
2024

УДК 691.3
ББК 38.3
Л 84

Рецензенты:

Добшиц Л.М. – профессор кафедры «Строительные материалы и технологии» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (МИИТ), доктор технических наук, профессор.

Загороднюк Л.Х. – заместитель заведующего кафедрой «Строительное материаловедение, изделия и конструкции», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», доктор технических наук, профессор.

Л 84 Лукутцова Н.П.
Строительные материалы. Часть 1: учебное пособие / Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин, Е.Ю. Горностаева, С.В. Васюнина, Е.Г. Карпиков: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Брянский государственный инженерно-технологический университет. – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2024. – 219 с.

ISBN 978-5-907857-68-1

В учебном пособии изложены теоретические основы строительного материаловедения, рассмотрены горные породы как сырье для производства строительных материалов, неорганические и органические вяжущие вещества, материалы для бетонов.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры по направлениям подготовки 08.03.01, 08.04.01 «Строительство», а также может быть полезно аспирантам и инженерно-техническим работникам научно-исследовательских и производственных организаций.

ISBN 978-5-907857-68-1

УДК 691.3
ББК 38.3

© ФГБОУ ВО «Брянский государственный
инженерно-технологический университет», 2024
© Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин, Е.Ю. Горностаева,
С.В. Васюнина, Е.Г. Карпиков, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ **4**
ГЛАВА 1. ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ **5**
1.1 Основные понятия и общие сведения о строительных материалах 5
1.2 Жизненный цикл строительного материала 8
1.3 Состав и строение материала 12
1.4 Структуры строительных материалов 20
1.5 Классификация строительных материалов 29
1.6 Свойства строительных материалов 30
1.7 Стандартизация и оценка качества строительных материалов 77
ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ **82**
2.1 Общие сведения о горных породах 82
2.2 Структура и текстура горных пород 83
2.3 Породообразующие минералы 85
2.4 Магматические горные породы 91
2.5 Осадочные горные породы 94
2.6 Метаморфические горные породы 95
ГЛАВА 3. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА **97**
3.1 Гипсовые вяжущие вещества 98
3.2 Строительная воздушная известь 103
3.3 Общестроительные цементы 109
3.4 Специальные цементы 128
ГЛАВА 4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА **136**
4.1 Битумы и битумные эмульсии 138
4.2 Термопластичные полимеры 148
4.3 Термореактивные полимеры 154
4.4 Природные полимеры 157
ГЛАВА 5. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БЕТОНОВ **160**
5.1 Классификация бетонов 160
5.2 Вяжущие вещества 163
5.3 Заполнители 165
5.4 Вода 182
5.5 Добавки 184
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК **205**
ПРИЛОЖЕНИЯ **207**

ВВЕДЕНИЕ

Строительство представляет собой приоритетную отрасль экономики страны, в которой применяются различные виды материалов, отличающиеся сырьевыми компонентами, составами и технологиями производства.

В настоящее время на рынке строительных материалов представлен широкий ассортимент продукции, которая позволяет обеспечить потребность строительной отрасли в материалах, изделиях и конструкциях.

Общая тенденция в производстве продукции строительного назначения связана в первую очередь с получением материалов и изделий с низким энергопотреблением, так как затраты на производство материалов составляют более половины от общей стоимости строительного объекта.

Одним из главных факторов развития строительной отрасли, повышения ее конкурентоспособности, кадрового и научного потенциала, рентабельности предприятий и в итоге повышения качества и комфорта среды жизнедеятельности человека является масштабное внедрение инноваций.

Инновационный материал представляет собой новый или значительно улучшенный продукт с обновленными потребительскими свойствами, получаемый по уникальной технологии производства.

Инновационный строительный материал должен отвечать ряду требований и соответствовать одному или нескольким из следующих критериев:

- упрощать и ускорять процесс строительства;
- снижать себестоимость строительного объекта и эксплуатационные расходы;
- повышать энергоэффективность здания или сооружения;
- увеличивать жизненный цикл строительного материала.

Производство и применение инновационных строительных материалов направлено на обеспечение объектов капитального строительства и жилищно-коммунального хозяйства новыми высокотехнологичными материалами и конструкциями.

В учебном пособии рассматриваются теоретические основы строительного материаловедения, горные породы как сырье для производства строительных материалов, неорганические и органические вяжущие вещества, материалы для бетонов.

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

1.1 Основные понятия и общие сведения о строительных материалах

Ни одно здание или сооружение невозможно спроектировать, построить и эксплуатировать без использования строительных материалов с соответствующими строительно-техническими свойствами. Различия в назначении и условиях эксплуатации зданий и сооружений определяют разнообразные требования к строительным материалам и их обширную номенклатуру.

Здания и сооружения состоит из одинаковых по назначению частей: фундамента, каркаса и ограждающих конструкций (стен, перекрытий, кровли).

Здание – объект, предназначенный для постоянного или временного пребывания в нем людей, запроектированный в качестве отдельно стоящего сооружения**.**

Помещение – пространство внутри здания, имеющее определенное функциональное назначение и ограниченное строительными конструкциями.

Строительный объект – строительное сооружение, здание, помещение, строительная конструкция, строительное изделие или основание.

Сооружение – один из видов инженерно-строительных объектов.

Строительным материалом называют природный или искусственный материал, применяемый при строительстве, ремонте или реконструкции зданий и сооружений.

Строительное изделие представляет собой отдельный элемент, предназначенный для применения в строительных конструкциях зданий или сооружений.

Строительная конструкция – часть здания или другого строительного сооружения, выполняющая определенные несущие, ограждающие и/или эстетические функции.

Получают строительные материалы из природного и техногенного сырья или путем их комбинирования по определенной технологии, позволяющей достичь определенного качества и свойств получаемого строительного продукта.

Свойство – характеристика материала, проявляющаяся в процессе его обработки, применении или эксплуатации.

Качество – совокупность свойств материала, обуславливающих его способность удовлетворять определённым требованиям в соответствии с его назначением.

Строительные материалы отличаются по исходному сырью, составу, структуре, форме, физико-механическим и техническим свойствам и технологии производства.

Технология – совокупность процессов обработки и переработки сырьевых материалов.

Природное сырье для производства строительных материалов может быть

минеральное и органическое.

К минеральному сырью относятся горные породы и минералы, из которых производят строительные материалы.

Органическое природное сырье – это древесина, каменные и бурые угли, нефть и др.

Расширение сырьевой базы промышленности строительных материалов возможно не только за счет разработки новых месторождений минерального сырья, но и за счет вовлечения в производственный процесс вторичных сырьевых ресурсов.

Вторичные материальные ресурсы – отходы производства и потребления, образующиеся в народном хозяйстве, для которых существует возможность повторного использования непосредственно или после дополнительной обработки.

Техногенные месторождения вторичных ресурсов – накопленные в результате хозяйственной деятельности залежи вторичных ресурсов, паспортизованные, зарегистрированные и содержащиеся в установленном порядке в качестве разведанных и утвержденных запасов вторичного сырья.

Из отраслей материального производства, способных потреблять промышленные (техногенные) отходы, наиболее емкой является промышленность строительных материалов.

Многие виды техногенных отходов по своему химическому и минералогическому составу близки к природному сырью, что позволяет в ряде случаев снизить затраты на производство и получить строительные материалы и изделия с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными показателями.

Для снижения стоимости строительства от излишних перевозок применяются материалы, добываемые или вырабатываемые вблизи строящегося объекта. Такие материалы называются **местными**. К ним относятся песок, щебень, гравий, глина и др. Они не только являются важным источником сырья, но и позволяют ускорить строительство объектов.

Большинство строительных материалов работает в сложных условиях – под воздействием значительных нагрузок и природно-климатических факторов. Высокие и низкие температуры, дождь, снег, растворы кислот, щелочей, солей, приводят к старению материала и его разрушению.

Различают две группы факторов, вызывающих изменение работоспособности материалов и изделий – внешние и внутренние. К внешним факторам относятся воздействие окружающей среды и особенности эксплуатации строительного материала. Внешние воздействия (температура, воздушные потоки, газы, химические вещества, звуковые колебания, радиация, биологические вредители, влага, сейсмические волны, блуждающие токи) могут вызвать ограничение или потерю работоспособности строительного материала (изделия) или его составных частей в процессе эксплуатации.

Внутренними факторами являются процессы старения и изнашивания, вызванные постоянными или временными нагрузками, ударными

воздействиями, вибрацией, колебаниями температуры, влажности окружающей среды.

Воздействие внешних и внутренних факторов на материалы изделий проявляется в основном путем: адсорбционного, диффузионного, химического, коррозионного или радиационного механизмов воздействия. Происходящие при этом физико-химические процессы приводят к изменениям значений параметров и характеристик материалов и изделий. Возможны изменения необратимые и обратимые. Примерами необратимых изменений являются коррозия металлов, изменение структуры материалов при интенсивном радиоактивном облучении.

К обратимым изменениям относятся такие, как восстановление свойств материала, адсорбировавшего газы или влагу своей поверхностью; восстановление свойств, значений параметров и характеристик изделий после прекращения температурных воздействий.

Основными эксплуатационными характеристиками строительных материалов являются: функциональная пригодность, безопасность, надежность, ремонтопригодность и долговечность.

Функциональная пригодность – способность строительного материала, изделия или конструкции сохранять свои функции в течение всего срока эксплуатации.

Строительные материалы, изделия и конструкции должны обладать **эксплуатационной безопасностью**, к которой относятся: механическая безопасность, пожарная безопасность, безопасные для здоровья человека условия проживания и пребывания в зданиях, безопасность для пользователей зданиями, безопасный уровень воздействия зданий на окружающую среду, безопасность при опасных природных процессах, явлениях и (или) техногенных воздействиях и др.

Надежность – способность строительного материала, изделия или конструкции выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации. Надежность является обобщенной характеристикой, включающей долговечность, срок службы, ремонтопригодность и отказ.

Ремонтопригодность – свойство строительного материала, изделия или конструкции, характеризующее его приспособленность к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта после отказа или повреждения.

Отказ – нарушение работоспособности строительного материала, изделия или конструкции, при котором система или элемент перестает выполнять целиком или частично свои функции.

Наиболее распространены причины возникновения отказов: за счет теплового разрушения (потеря тепловой устойчивости, расплавление и т.д.), деформация и механическое разрушение, электрохимическая коррозия, радиационное разрушение и т.д.

Процессы старения происходят непрерывно, причем они совершаются как во время работы, так и во время хранения и транспортирования изделий.

Вероятность влияния внутренних факторов возрастает по мере увеличения длительности эксплуатации и при нарушении режимов использования материалов.

Обеспечить требуемую работоспособность всех материалов, изделий и конструкций здания за установленную длительность их эксплуатации при минимальных затратах труда и финансовых средств позволяют рациональные конструктивные решения. Они значительно снижают или полностью исключают воздействие факторов, являющихся причиной изменения технического состояния объекта.

Срок службы – продолжительность нормативной эксплуатации строительного материала, изделия, конструкции с предусмотренным техническим обслуживанием и ремонтными работами, включая капитальный ремонт, до состояния, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна. Расчетный срок службы отсчитывается от начала эксплуатации материала или возобновления его эксплуатации после капитального ремонта.

Для уникальных зданий предусмотрен срок службы 100 и более лет, для зданий массового строительства – не менее 50 лет. Сооружения, эксплуатируемые в условиях сильноагрессивных сред (сосуды и резервуары, трубопроводы предприятий нефтеперерабатывающей, газовой и химической промышленности, сооружения в условиях морской среды и т.п.) должны иметь срок службы не менее 25 лет. Временные здания или сооружения (бытовки строительных рабочих и вахтового персонала, временные склады, летние павильоны и т.п.) рассчитаны на срок службы – 10 лет.

Долговечность – способность материала, изделия или конструкции сохранять установленные эксплуатационные показатели до предельного состояния с необходимыми перерывами на ремонт.

Долговечность относится к комплексной характеристике качества строительных материалов и выражается в их способности сопротивляться сложному воздействию внешних и внутренних факторов, проявляющихся в эксплуатационный период работы материала изделия или конструкции.

Современные объекты строительства можно отнести к огромным системам, в которых содержатся разнообразные по составу и условиям получения материалы, изделия и конструкции.

Правильный выбор материалов достигается на основе технико-экономических расчетов, сравнительного анализа и опыта применения их в строительной практике.

1.2 Жизненный цикл строительного материала

Внимание к защите окружающей среды связано в первую очередь с активным вмешательством человека в природные процессы.

Дорожные карты устойчивого развития промышленности до 2050 г. основной задачей ставят существенное сокращение выбросов в окружающую

среду, снижение использования природных материалов и невозобновляемых источников электроэнергии, сокращение объема отходов и увеличение доли биоразлагаемых материалов в составе отходов.

Современный уровень развития индустрии предполагает закрепление за производством строительных материалов одной из ключевых ролей в решении экологических проблем цивилизации.

Применение техногенных отходов для замещения природного сырья и технологического топлива станет вторым по значимости резервом снижения себестоимости строительных материалов после модернизации производства с использованием энергоэффективных технологий.

Кроме того, использование отходов в производстве строительных материалов позволяет сократить изъятие земель для добычи природного сырья, которого ежегодно только цементная промышленность добывает около 130 млн. т.

В ходе технологической переработки сырья кроме целевого продукта (материала), как правило, образуются отходы. Однако, то, что считается отходами для одного производственного цикла, может служить сырьем для другого. В этом случае такие материалы являются вторичным сырьем.

Безотходная технология – это вид организации производства с использованием сырья и энергии в замкнутом цикле.

Целью безотходной технологии является уменьшение потока неиспользованных отходов так, чтобы сохранялось естественное равновесие биосферы, а также обеспечение сохранения природных ресурсов.

«Сырье – производство – потребление – вторичное сырье» – цепочка замкнутого жизненного цикла.

Жизненный цикл – это последовательные и взаимосвязанные стадии системы жизненного цикла материала от его проектирования до окончательного размещения в окружающей среде.

При экологической оценке в строительстве учитываются не только экологическая безопасность строительного материала для человека, но и возможные негативные воздействия, приводящие к обострению глобальных экологических проблем (парниковый эффект, повреждение озонового слоя, загрязнение почв, истощение ресурсов и т.д.).

Экологические эффекты по жизненному циклу строительного материала и экологических нагрузок на окружающую среду включает шесть этапов (рис. 1.1): проектирование строительного материала (СМ), добыча сырья, производство СМ, применение СМ, эксплуатация СМ, уничтожение или повторное использование СМ.

Это позволяет «замкнуть» жизненный цикл материала и решить экологические задачи – сократить количество отходов и обеспечить ресурсосбережение.

Экологический эффект (F), связанный с производством строительного материала может быть оценен не только на каждой стадии его производства (fi), но и в целом по всему жизненному циклу:

$$F = \Sigma(f_i) = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6. \quad (1.1)$$

где f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6 – экологические эффекты на каждой стадии жизненного цикла строительного материала.



Рис. 1.1. Основные стадии жизненного цикла строительного материала

На первой стадии жизненного цикла (проектирование СМ) оцениваются экологические эффекты, связанные с производством и эксплуатацией строительного материала.

На второй стадии (добыча сырья) оцениваются последствия исчерпания ресурсов (материальных, энергетических, природных и др.).

Для третьей стадии жизненного цикла (производство СМ) устанавливаются факторы, представляющие значительную экологическую опасность при производстве продукции строительного назначения. Основными источниками загрязнения воздушного пространства считаются цементные, асбестоцементные и асфальтобетонные заводы, предприятия по производству силикатного кирпича, керамзитового гравия, сухих строительных смесей,

строительной химии и др. Кроме того, эти же предприятия негативно воздействуют на почвы и водоемы.

На четвертой стадии (применение СМ) устанавливаются возможные вредные выбросы в воздух, почву, водоемы и их экологические последствия на загрязнение окружающей среды.

На пятой стадии (эксплуатация СМ) – оцениваются загрязняющие вещества, влияющие на здоровье человека, выделяемые строительными материалами в процессе их эксплуатации при изменении температуры, влажности и др. К ним относятся летучие органические вещества отделочных и облицовочных материалов.

На шестой стадии (уничтожение или повторное использование СМ) определяются экологические последствия от размещения отходов в окружающей среде или повторного применения как техногенного сырья, что позволяет «замкнуть» жизненный цикл строительного материала и решить экологические задачи – сократить, а в ряде случаев исключить накопление отходов в отвалах и хранилищах и устранить вредные выбросы в окружающую среду, обеспечив ресурсосбережение.

Оценка нагрузок на окружающую среду по жизненному циклу дает возможность качественной экологической оценке любого строительного материала. Данная схема позволяет прогнозировать наиболее существенные риски на каждом этапе жизненного цикла материала – от добычи сырья до его уничтожения (утилизации).

Промышленность строительных материалов оказывает наибольшее влияние на окружающую среду, так как создание строительной продукции требует значительно больших затрат времени по сравнению с других видами производства.

Основные направления снижения влияния предприятия на окружающую среду – использование современных технологических установок, совершенствование технологических процессов, применение современных технологий очистки газовых выбросов и промышленных стоков, утилизации промышленных отходов, производство нефтепродуктов с улучшенными экологическими свойствами.

В рамках повышения безопасности и качества окружающей среды, получило развитие направление «зеленого строительства».

«Зеленое» строительство характеризуется применением новейших технологий и материалов, позволяющих снизить энергопотребление при строительстве и эксплуатации объектов, а также минимизировать негативное влияние на окружающую среду.

В мировой и российской практике накоплен достаточно широкий опыт разработки «зеленых» стандартов для строительной отрасли, развитие и распространение которых будет способствовать внедрению современных технологий в строительстве, а также повышению безопасности и качества условий жизнедеятельности человека.

Решение этой проблемы средствами материаловедения имеет важнейшую

экономическую и общественную направленность.

1.3 Состав и строение материала

Свойства строительных материалов определяются их составом и строением. Различают химический, минеральный (минералогический) и фазовый составы.

Химический состав является важнейшей характеристикой и указывает на процентное содержание химических элементов в материале. Химический состав вяжущих веществ и природных каменных материалов часто выражают количеством содержащихся в них оксидов.

По химическому составу строительные материалы подразделяются на минеральные и органические. Химический состав минеральных материалов представлен такими основными химическими элементами, как кремний (Si), кальций (Ca), алюминий (Al), железо (Fe) и другие, а органических – водород (H), кислород (O), сера (S) и азот (N).

К минеральным материалам относятся: керамика, стекло, бетоны, металлы, к органическим – древесина, битумы, пластмассы, лакокрасочные материалы. По химическому составу строительного материала можно судить о его технических характеристиках, таких как прочность, химическая стойкость, огнестойкость. Так, например, все органические вещества горючи и в большей степени подвержены процессу старения; минеральные относятся к огнестойким и имеют более длительный срок службы.

Важнейшей характеристикой строительных материалов является минералогический состав.

Минералогический состав характеризует содержание минералов и их количество в строительном материале.

Минералом называется однородное по составу и строению химическое соединение или самостоятельно существующий химический элемент в твердом агрегатном состоянии, возникшие в земной коре в результате физико-химических процессов.

Минеральный состав дает более полную информацию о материале. Зная содержание тех или иных минералов, можно прогнозировать свойства вяжущих веществ и искусственных каменных материалов.

Например, по содержанию трехкальциевого силиката $3CaO \cdot SiO_2$ в портландцементном клинкере можно судить о прочности цементного камня, а по количеству трехкальциевого алюмината $3CaO \cdot Al_2O_3$ – о скорости гидратации вяжущего и морозостойкости цементных бетонов.

При описании многих физических и химических систем используется понятие фаза.

Фаза – обособленная часть структуры, отделенная от других, границей раздела (межфазной границей), при переходе через которую могут меняться состав, строение и свойства.

Фаза может быть **сплошной** или **дисперсной** (раздробленной на

множество отдельных частиц).

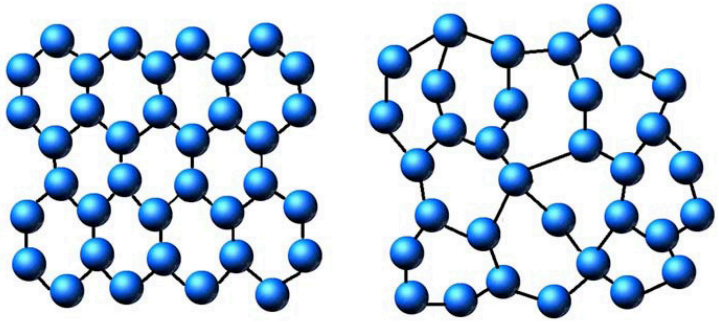
Сплошной фазой принято считать фазу, из любой точки которой можно попасть в любую другую точку, не пересекая межфазную границу.

Фазовый состав характеризует число фаз (твердой, жидкой, газовой), то есть число однородных по химическому составу и физическим свойствам частей и отделенных друг от друга поверхностями раздела. Материалы, состоящие из одной фазы, называются гомогенными, а из двух и более – гетерогенными.

Строительные материалы, в основном, относится к гетерогенным системам, состоящих из двух и более фаз.

К основным фазам пористого материала относятся твердое вещество и поры. Если поры заполнены частично или полностью воздухом – образуется газовая фаза, если водой – жидкая фаза. Вода в порах может находиться в жидком, газообразном и твердом состоянии (в виде льда). При переходе из одной фазы в другую свойства материала будут меняться.

Твердые тела (материалы), встречающиеся в природе, могут находиться в **кристаллическом** или в **аморфном** состоянии (рис. 1.2).



а) б)

Рис. 1.2. Кристаллическое (а) и аморфное (б) состояние материала

Аморфные вещества значительно отличаются от своих кристаллических аналогов по строению и, следовательно, по свойствам.

Если для кристаллов каждого вещества характерна определенная форма, то в аморфном состоянии этого не наблюдается.

В аморфных веществах существует ближний порядок – согласованность в расположении соседних частиц, то есть порядок, соблюдаемый на расстояниях, сравнимых с размерами молекул.

С расстоянием эта согласованность уменьшается и через 0,5-1 нм исчезает. Такой порядок называется ближним порядком. Он не повторяется по всем направлениям и не сохраняется на больших расстояниях, как у кристаллических тел. Несмотря на то, что у аморфных веществ нет кристаллической решётки, они способны сохранять форму.

Неодинаковое строение кристаллических и аморфных веществ определяет и различие в их свойствах.

К главным отличительным особенностям аморфных веществ относится изотропность, то есть одинаковые свойства по всем направлениям и отсутствие определенной температуры плавления. При нагревании в отличие от кристаллических веществ они не плавятся, а размягчаются и постепенно переходят в жидкое состояние.

Зависимость «температура-время» при переходе расплава в кристаллическое или аморфное стеклообразное состояние представлено на рис. 1.3.

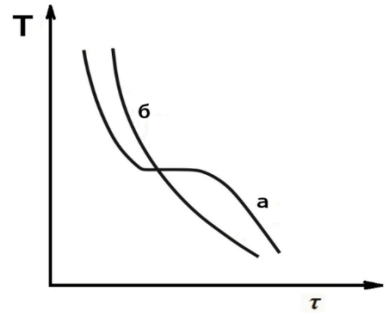


Рис. 1.3. Зависимость «температура-время» при охлаждении расплава или жидкости: а – кристаллического вещества; б – аморфного и стекловидного вещества

При охлаждении аморфных тел нет явной температуры перехода из жидкого состояния в твёрдое, в то время как кристаллические тела имеют конкретную температуру кристаллизации.

При охлаждении расплава или жидкости в случае кристаллического вещества (а) на кривой зависимости появляется горизонтальная площадка, которая связана с повышенным выделением тепла в результате структурных превращений, сопровождающих переход жидкости в кристаллы, имеющие меньший запас энергии.

Если скорость внутренних превращений мала, то наступает постепенное охлаждение (переохлаждение) жидкости и происходит постепенное превращение жидкости в стекло (случай б).

Стеклообразное состояние вещества термодинамически неустойчивое. Стекло может самопроизвольно переходить в кристаллическое состояние, что сопровождается скачкообразным изменением свойств с выделением избыточной энергии. Кристаллическое вещество можно перевести в стеклообразное только через расплав и резкое переохлаждение.

Образование аморфных веществ происходит при быстром охлаждении расплавов, так как при переходе в твердое состояние атомы не успевают

перестроиться и сформировать кристаллическую решетку, а остаются вблизи тех положений, которые занимали в расплаве. Расплавляя кристаллический кварц, а затем, быстро охлаждая расплав, получают кварцевое стекло, структура которого аморфная.

Аморфные вещества, как правило, менее прочные, чем кристаллические. Для повышения прочности, например, стеклянных изделий проводят кристаллизацию стекол (ситаллы, шлакоситаллы). Вещества аморфной структуры могут быть прозрачны, так как не имеют границ между кристаллами, рассеивающих световые волны.

Аморфное состояние вещества неустойчиво и постепенно переходит в кристаллическое.

В отличие от кристаллических, аморфные вещества химически более активные. Поэтому такие горные породы, как трепел, опока, туфы, диатомит, имеющие аморфную структуру, применяют в качестве активных минеральных добавок к цементам и бетонам. К аморфным веществам принадлежат также стекла (искусственные и вулканические), естественные и искусственные смолы, клеи, парафин, воск и др.

Образование упорядоченной кристаллической структуры при затвердевании жидкостей является энергетически выгодным и сопровождается уменьшением свободной энергии системы. Изменение объема при кристаллизации невелико, оно составляет около 10 %. При этом расстояние между частицами при переходе из жидкого состояния в твердое изменяется примерно на 3 %.

Кристаллические вещества характеризуется упорядоченной структурой, повышенной стабильностью, определенной температурой плавления, которая равна температуре отверждения, и геометрической формой кристаллов. Вещества в форме кристаллов обладают меньшей поверхностной и внутренней энергией, чем в аморфном состоянии, и поэтому более устойчивы.

Свойства кристаллов зависят: от электронного строения атомов, характера взаимодействия их в кристалле, от пространственного расположения элементарных частиц, химического состава, размера и формы кристаллов и др.

Известно, что кристаллизация из растворов включает в себя две основные стадии образование кристаллических зародышей и их дальнейший рост, взаимодействие между собой и с исходным раствором. Соответственно, кинетика кристаллизации характеризуется двумя величинами: скоростью образования зародышей и скоростью роста кристаллов.

Скорость кристаллизации υ зависит от коэффициента диффузии D, площади поверхности кристалла S, толщины диффузного слоя d, разности концентрации перенасыщенного раствора $C_п$ и концентрации на поверхности кристалла ($C_н$) и определяется по формуле:

$$\upsilon = [D \cdot S \cdot (C_п - C_н)] / d. \qquad (1.2)$$

Мелкокристаллическая структура обеспечивает большую прочность и

однородность материала и получается при условии, что скорость образования зародышей больше скорости кристаллизации:

$$\upsilon_1 \geq \upsilon_2, \qquad (1.3)$$

где υ_1 – скорость образования зародыша кристалла;

υ_2 – скорость роста кристалла.

К основным свойствам кристаллов относятся: анизотропность, однородность, наличие постоянной температуры плавления.

Анизотропность – зависимость свойств материала (кристалла) от выбранного направления. Оно объясняется различием в плотности расположения частиц в кристаллической решетке по разным направлениям. Анизотропия свойств характерна для одиночных кристаллов или так называемых монокристаллов.

На рисунке 1.4 условно изображено расположение атомов в одной из плоскостей монокристалла. Через узлы этой плоской решетки проведены различно ориентированные параллельные прямые (1, 2, 3, 4).

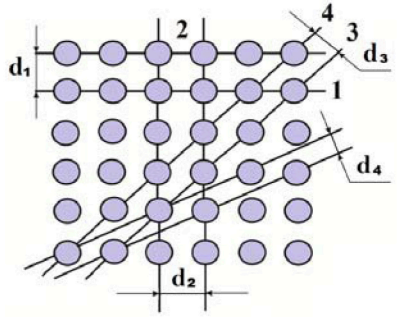


Рис. 1.4. Анизотропность материала

Видно, что на единицу длины прямых приходится неодинаковое количество атомов, а многие механические, электрические, оптические и другие свойства кристалла зависят от плотности размещения образующих его частиц.

Кусочек слюды легко расслаивается в одном из направлений на тонкие пластинки, но разорвать его в направлении, перпендикулярном пластинкам, гораздо труднее. Также легко расслаивается в одном направлении кристалл графита – такое расслоение происходит непрерывно при письме карандашом, при этом тонкие слои графита остаются на бумаге. Многие кристаллы по-разному проводят теплоту и электрический ток в различных направлениях. От направления зависят и оптические свойства кристаллов.

Большинство же строительных материалов имеют поликристаллическое

строение. Такие материалы состоят из большого числа кристаллов или зерен. При этом каждое отдельное зерно анизотропно. Различная ориентация отдельных зерен приводит к тому, что в целом свойства поликристаллического материала являются усредненными.

Важная особенность кристаллических веществ заключается в развитии в них явлений полиморфизма и изоморфизма.

Изоморфизм – способность атомов, ионов или молекул в кристаллических структурах замещать друг друга. В результате этого процесса образуются твердые растворы замещения.

Вещества, которым присущ изоморфизм, называются **изоморфными**.

Случаи изоморфизма встречается, например, в кальците ($CaCO_3$), у которого до 22 % кальция может замещаться магнием.

Способность вещества в твердом состоянии существовать в различных кристаллических формах при одном и том же химическом составе называется **полиморфизмом**. Примером полиморфного перехода является превращение графита в алмаз. Этот переход при производстве искусственных алмазов осуществляется при давлениях 60-100 тыс. атмосфер и температурах 1500-2000 К.

Другим примером могут служить полиморфные модификации $CaCO_3$ – кальцит (тригональный) и арагонит (ромбический) и др.

Самый распространенный в земной каре и широко применяемый в строительстве минерал кварц (диоксид кремния SiO_2) встречается в 3 модификациях: кварц, тридимит и кристобаллит. Кварц устойчив до температуры 870 °С. При нагревании выше 870 °С он переходит в тридимит, а более 1470 °С – в кристобаллит:

$$\underset{}{\alpha\text{-кварц}} \overset{573^\circ}{\Leftrightarrow} \beta\text{-кварц} \overset{870^\circ}{\Leftrightarrow} \beta\text{-тридимит} \overset{1470^\circ}{\Leftrightarrow} \beta\text{-кристобалит} \overset{1713^\circ}{\Leftrightarrow} \text{расплав}$$

Полиморфные превращения кварца при нагревании сопровождаются изменением его объема.

При кристаллизации вещества из раствора или расплава первой образуется наименее устойчивая фаза, наиболее близкая к раствору по величине свободной энергии. По этой причине метастабильные формы обладают меньшим внутренним сцеплением молекул, что отражается на их физических свойствах, в частности, в повышенной растворимости.

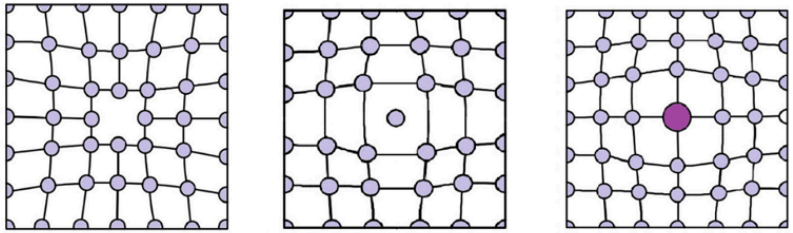
При изменении условий кристаллизации (температура, давление, растворитель, концентрация, скорость кристаллизации, образование зародышей кристаллизации, присутствие примесей и их концентрация и т.п.) могут образовываться различные кристаллические формы или сольваты.

Строение реальных кристаллов отличается от идеальных. В реальных кристаллах всегда содержатся дефекты, а потому нет идеально правильного расположения атомов во всём объёме кристалла.

Дефекты реальных кристаллов подразделяют на химические, связанные с

включением в кристалл примесей, то есть чужеродных частиц, и структурные, представляющие собой различные отклонения строения реальных кристаллов от идеальной кристаллической решетки.

Дефекты кристаллов подразделяют на точечные, линейные, поверхностные и объемные. К простейшим точечным дефектам относятся: вакансии (а), межузельные внедренные атомы, находящиеся в пустотах кристаллической решетки (б) и замещенные атомы (в) (рис. 1.5).



а) б) в)

Рис. 1.5. Точечные дефекты структуры: а – вакансия; б – внедрение; в – замещение

Точечные дефекты обусловлены неправильным расположением атомов в кристаллической решетке. Какой-либо ион может перейти из узла решетки в пространство между ее узлами (междоузлие). В результате образуется сразу два дефекта – незанятый, пустой узел решетки – вакансия и ион междоузлия.

Такую пару дефектов называют дефектами по Френкелю, по имени советского ученого Я.И. Френкеля, предположившего в 1926 г. этот механизм образования дефектов кристаллической решетки. При этом электрическая нейтральность решетки сохраняется.

В реальной решетке может возникнуть и одновременно два пустых узла, которые в идеальной решетке занимают положительно и отрицательно заряженные ионы. Эту пару вакансий катиона и аниона называют дефектами по Шоттки, по фамилии ученого, предложившего в 1930 г. такую схему образования дефектов. Дефекты по Френкелю и по Шоттки – равновесные дефекты. Они всегда неизбежно присутствуют в реальных кристаллах, и количество их быстро увеличивается при повышении температуры. Наличие этих дефектов обусловливает целый ряд явлений в твердых телах, таких как диффузия.

Вакансия − отсутствие атома или иона в узле кристаллической решетки.

Вакансии являются самой важной разновидностью точечных дефектов; они ускоряют все процессы, связанные с перемещением атомов: диффузия, спекание порошков и т.д. В технически чистых металлах точечные дефекты повышают электросопротивление и почти не влияют на механические свойства.

Межузельный атом – атом, перемещенный из узла в позицию между узлами.

Атомы внедрения – это атомы примесного элемента, находящиеся в междоузлиях кристаллической решетки.

Все виды точечных дефектов искажают кристаллическую решетку и в определенной мере влияют на физические свойства и фазовые превращения в материалах.

К линейным дефектам кристаллического строения относятся **дислокации**, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей.

Дислокации бывают двух видов: краевые и винтовые. Образуются дислокации в результате локальных или местных смещений кристаллографических плоскостей, происходящих в кристаллической решетке зерен на различных технологических этапах их формирования. Наиболее распространенной является краевая дислокация. Она представляет собой локализованное искажение кристаллической решетки, вызванное наличием атомной полуплоскости или экстраплоскости.

Краевая дислокация в сечении представляет собой край «лишней» полуплоскости в решётке. Вокруг дислокаций решётка упруго искажена. Мерой искажения служит так называемый вектор Бюргерса (рис. 1.6).

У краевой дислокации вектор Бюргерса равен межатомному расстоянию и перпендикулярен дислокационной линии, у винтовой дислокации – параллелен ей.

Энергия, требуемая для образования дислокаций, достаточно велика, поэтому они не могут появиться в результате тепловых колебаний частиц, составляющих кристаллическую решетку. Дислокации возникают при росте кристаллов или при действии на них механических напряжений. Плотность их большая, поэтому они значительно влияют на свойства материалов, наряду с другими дефектами участвуют в фазовых превращениях.

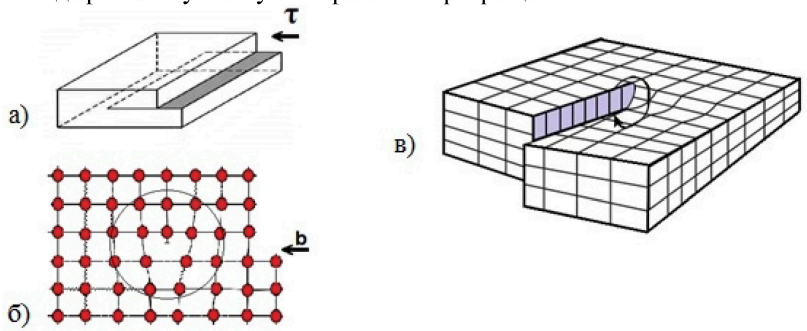


Рис. 1.6. Дислокации в структуре веществ: а – сдвиг, создавший краевую дислокацию (τ – сдвиговое напряжение); б – схема расположения атомов у краевой дислокации (b – направление сдвига); в – пространственная модель винтовая дислокации

Наличие дислокаций объясняет многие свойства кристаллических тел, например, высокую пластичность и относительно низкую прочность чистых

металлов, так как смещение дислокаций происходит при небольших напряжениях.

1.4 Структуры строительных материалов

Структура материала характеризуется качественным и количественным соотношением составляющих, их взаимным расположением и связями между ними.

Под структурой или внутренним строением материала понимают пространственное расположение частиц различной формы, размера и строения, капилляров, пор, микротрещин и других структурных элементов, соединенных между собой устойчивыми взаимными связями, обеспечивающими его целостность и сохранение основных свойств при внешних и внутренних изменениях.

Структуру материалов, ее общие признаки и особенности можно рассматривать на разных уровнях в зависимости от размеров структурных элементов (L) (рис. 1.7-1.9): макроскопический (L более 10^{-4} м) микроскопический (L=10^{-7} – 10^{-4} м), ультрамикроструктурный/наноструктурный (L= 10^{-9} – 10^{-7} м), атомно-молекулярный (L менее 10^{-9} м).

Макроструктура – это строение материала, видимое без увеличения или при небольшом увеличении. К элементам макроструктуры относятся зерна крупного и мелкого заполнителя, макроволокна, поры, пустоты и трещины. Размеры структурных элементов макроструктуры составляют более 10^{-4} м.

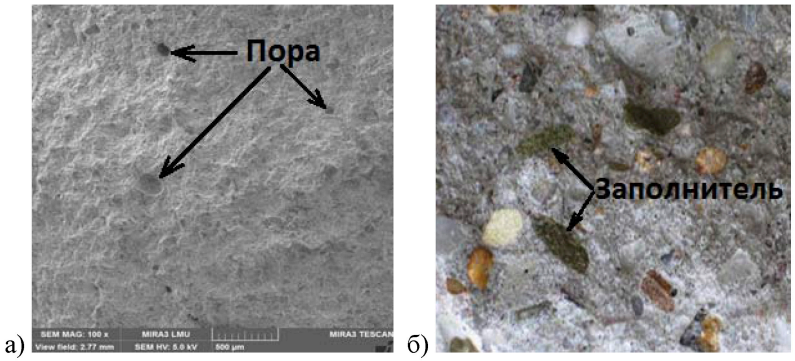


Рис. 1.7. Макроструктуры строительных материалов: а – цементный камень; б – мелкозернистый бетон.

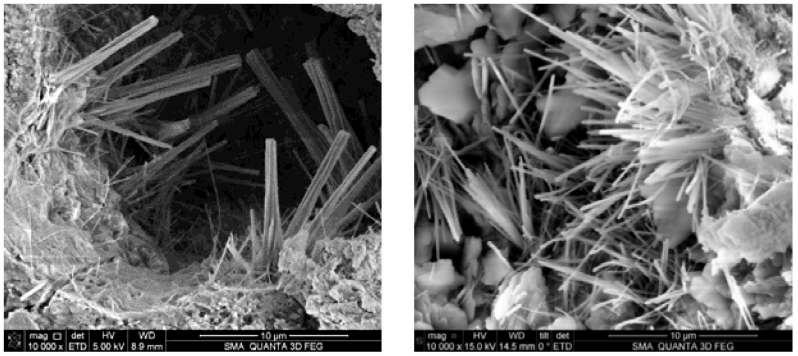
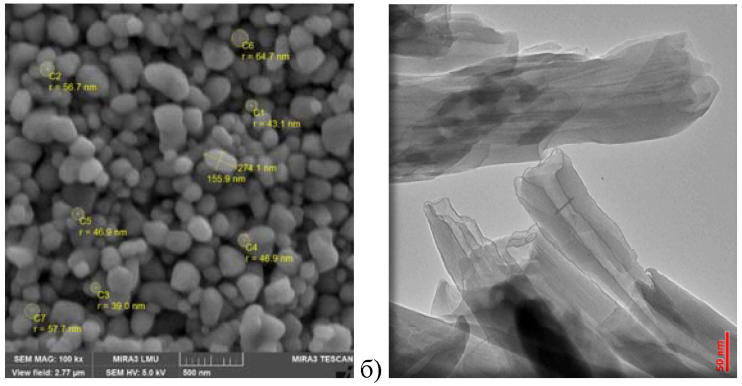


Рис. 1.8. Микроструктуры мелкозернистого бетона



а) б)

Рис. 1.9. Наноструктуры минеральных наполнителей: а – сплошная (диоксид титана, сканирующая электронная микроскопия); б – пористая (галлуазитовые нанотрубки (просвечивающая электронная микроскопия)

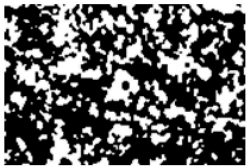
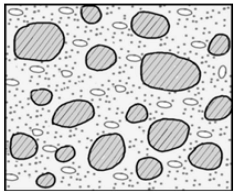
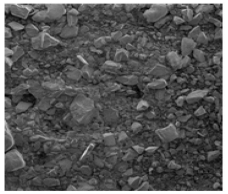
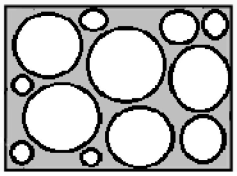
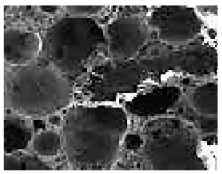
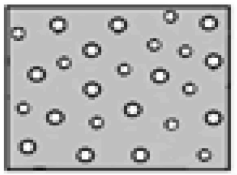
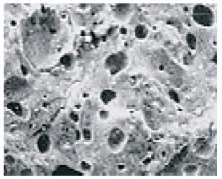
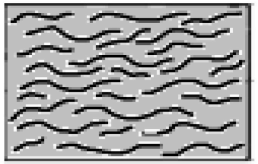
Исследование макроструктуры может проводиться непосредственно на поверхности материала, в изломе или на специально подготовленном образце.

По макроструктуре можно сделать предварительное заключение о материале и его свойствах. Например, материалы пористой структуры имеют лучшие теплотехнические показатели по сравнению с плотными структурами; волокнистые и слоистые – хорошо сопротивляются изгибающим и растягивающим нагрузкам и т.д. Прочность материала при одном и том же вещественном составе, но разной структуре может меняться в несколько раз.

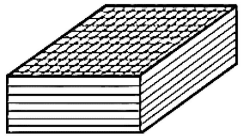
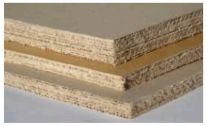
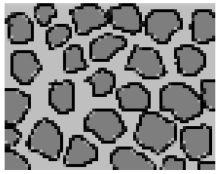
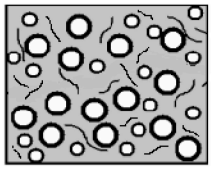
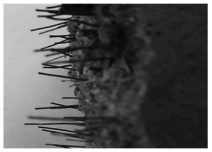
Структура строительного материала может быть одно-, двух- и многокомпонентной. Различают плотную, конгломератную, волокнистую, слоистую, ячеистую, рыхлозернистую и композитную макроструктуры (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Виды макроструктур строительных материалов

Вид макро-структуры	Материалы	Изображение структуры	
1	2	3	
Плотная	Стекло, металлы		
Конгло-мератная	Бетоны, растворы		
Ячеистая	Пенобетон, газобетон и их разновидности, ячеистое стекло, вспененные пластмассы и др.		
Мелко-пористая	Керамика, пеностекло и другие поризованные материалы		
Волокнистая	Древесина, хризотил, фибра хризотилцемент, древесно-волокнистые плиты		

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
Слоистая	Ламинат, древесно-слоистые пластики, текстолит, фанера		
Рыхло-зернистая	Цемент, гипс, песок, щебень, керамзитовый гравий		
Композитная	Дисперсно-армированный пенобетон, мелкозернистый бетон и другие композиционные материалы		

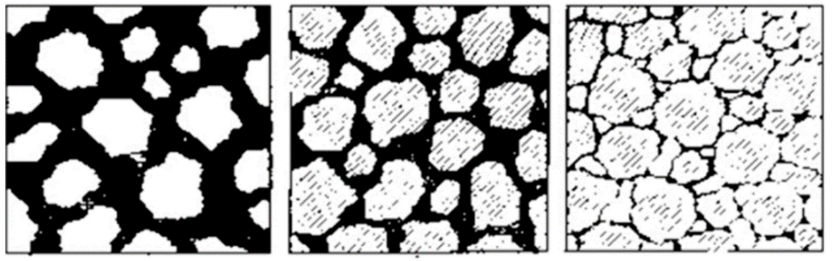
Плотная структура – структура, составные части которой плотно прилегают друг к другу, не оставляя свободных промежутков, пор и пустот. Плотную однородную структуру имеют такие материалы, как металлы, стекло, битум и т.п. Получают материалы плотной структуры из расплава в результате его охлаждения.

Конгломератная структура характеризуется тем, что частицы крупного и мелкого заполнителя объединены связующим веществом в единый монолит. **Конгломераты** – это большая группа, объединяющая некоторые природные каменные материалы (сцементированные рыхлые горные породы), бетоны, растворы.

У материалов конгломератной структуры плотность в различных точках объема может значительно отличаться, что создает ослабленные дефектные участки, свойства которых будут ниже (морозостойкость и др.) или выше (водопоглощение и др.), чем в других его частях.

В зависимости от количества заполнителя в конгломератных материалах (асфальто- или цементобетон) выделяют три вида структуры: базальная, поровая и контактная (рис. 1.10).

В конгломератных материалах с базальной структурой частицы крупного заполнителя находятся в растворе и не контактируют между собой. В этом случае свойства материалов определяются преимущественно свойствами вяжущего, в то время как влияние заполнителя невелико.



а) б) в)

Рис. 1.10. Схема структур конгломератных материалов:
а – базальная; б – поровая; в – контактная

При увеличении содержания частиц крупного заполнителя происходит формирование плотного с контактирующими между собой через тонкие прослойки вяжущего частицами заполнителя. Такая структура называется поровой. В такой структуре нагрузка распределяется примерно поровну между вяжущем и заполнителем.

Увеличение содержания частиц крупного заполнителя приводит к формированию контактной структуры, в которой они будут плотно прилегать друг к другу, создавая прочный каркас. Основную нагрузку в такой структуре воспринимает заполнитель.

Переход от одной структуры к другой меняет свойства материала (плотность, прочность, водопоглощение и др.).

Ячеистая структура отличается содержанием замкнутых пор, заполненных воздухом (газом) или паровоздушной смесью. Мелкие воздушные поры размером от 0,1 до 2 мм равномерно распределены в материале и разделены тонкими и прочными перегородками, которые образуют его пространственный каркас.

К искусственным материалам ячеистой структуры относятся пенобетон, газобетон и их разновидности, ячеистое стекло, некоторые виды пластмасс (пенополиуретан, пенополиэтилен, пенополистирол), к природным – вулканическая пемза.

Мелкопористая структура характеризуется наличием замкнутых равномерно распределенных по объему материала микропор размерами от сотни долей до 1 мм и разной конфигурации. Такую структуру имеет керамика, пеностекло и другие поризованные материалы.

Волокнистая структура отличается наличием волокон, равномерно или хаотично распределенных по объему материала в связанном или рыхлом состоянии. Для материалов волокнистой структуры характерно такое свойство, как анизотропия, то есть различие теплопроводности и прочности вдоль и поперек волокон.

К природным материалам волокнистой структуры относится древесина, которая вдоль и поперек волокон имеет различную прочность,

теплопроводность, усадку, набухание. Волокнистую структуру имеют такие искусственные материалы, как хризотилцементные и минераловатные плиты, армоцемент и другие.

Слоистую структуру имеют рулонные, плитные и листовые материалы (ламинат, линолеум, фанера и др.)

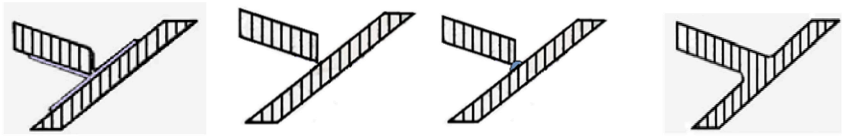
Слоистая структура отличается наличием нескольких слоев материала одной или разной толщины, расположенных вплотную или с воздушным зазором и образующих лист, плиту, рулон.

Рыхлозернистая структура характерна для всех сыпучих материалов и состоит из отдельных зерен, удерживаемых относительно друг друга за счет точечной связи.

Композитная структура присуща материалам, в которых сочетается несколько видов структур. Например, фибробетон объединяет в себе две структуры: конгломератную и волокнистую.

Микроструктура – строение материала, видимое при увеличении в микроскопе. К структурным элементам микроструктуры относятся кристаллы, частицы, микроволокна, аморфные составляющие новообразований с размерами от 10^{-9} до 10^{-4} м, а также поры.

По характеру связей между новообразованиями структуры твердения по П.А. Ребиндеру можно условно разделить на типы: коагуляционную, конденсационную и кристаллизационную (рис. 1.11).



а) б) в) г)

Рис. 1.11. Виды связей в дисперсных микроструктурах:
а – коагуляционная; б – условно-коагуляционная; в – конденсационная;
г – кристаллизационная

Коагуляционными называют структуры, в которых связь между частицами осуществляется за счет относительно слабых ван-дер-ваальсовых сил межмолекулярного взаимодействия через прослойки жидкой фазы (рис. 1.11, а). Прочность таких структур зависит от прочности элементарных контактов и их числа в единице объема.

Коагуляционным структурам свойственна обратимость. Такие структуры могут самопроизвольно восстанавливаться через некоторое время после разрушения. При этом возможно неоднократное обратимое восстановление структуры. Такое явление называется **тиксотропией**.

Материалы с коагуляционной структурой (асфальтобетонная и цементобетонная смеси) в зависимости от содержания жидкой фазы обладают

подвижностью, пластичностью, тиксотропией и относительно невысокой прочностью.

Условно-коагуляционные структуры возникают при механическом переплетении в виде «хвороста» или «войлока» частиц обычно удлинённой формы. Отличительная особенность этих структур – отсутствие между контактирующими частицами жидких прослоек (рис. 1.11, б). Такие контакты значительно прочнее, чем коагуляционные. Они проявляются при высушивании материалов. Однако при смачивании прочность их снижается до уровня прочности коагуляционных контактов, а затем восстанавливается при вторичном полном высушивании. Структура такого рода характерна для поликристаллических гипсовых сростков. Они проявляют себя в гипсовых изделиях, для которых типично сильное (примерно в два раза) снижение прочности при смачивании.

Конденсационными называют структуры, в которых непосредственный контакт между частицами происходит за счет прямого срастания между частицами аморфных фаз (рис. 1.11, в).

Конденсационные структуры образуются из коагуляционных структур вследствие уменьшения в системе жидкой фазы (например, необожженный, высушенный керамический кирпич). Характеризуются такие структуры отсутствием жидких прослоек между контактирующими частицами. Такие контакты проявляются при высушивании материалов и имеют большую прочность, чем коагуляционные структуры.

Конденсационные структуры возникают вследствие контактов прямого срастания, но не между кристаллами, а между частицами аморфных фаз. Такое структурообразование характерно для ряда стекол и органических полимерных материалов.

Кристаллизационными называются структуры, в которых контакт между частицами осуществляется путем прямого срастания с образованием пространственной сетки или каркаса с более или менее правильным строением, обусловленные химическими силами (рис. 1.11, г).

Для составляющих цементного камня кристаллизационное структурообразование происходит в результате прямого срастания между собой кристалликов соответствующих гидратов.

Кристаллизационные контакты не обладают заметной эластичностью и разрушаются необратимо.

Ультрамикроструктура (**наноструктура**) характеризует строение материала на уровне частиц, имеющих размеры менее 100 нм (1 нм $=10^{-9}$ м). Элементами наноструктуры являются наночастицы, нанокристаллы, частицы аморфной фазы и коллоидные частицы, поры в пределах указанных размеров. Элементы наноструктуры обладают уникальными свойствами, зачастую существенно отличающимися от свойств того же вещества в конденсированной фазе.

Наноструктуры подразделяются на сплошные и пористые. К первым относят наночастицы – нанокристаллы и нанокластеры, нановолокна,

нанопленки, к пористым – нанотрубки и объемные наноструктуры.

Нанообъект – дискретная часть материи или, наоборот, её локальное отсутствие, размер которой хотя бы в одном измерении находится в нанодиапазоне.

Изучаются микро- и наноструктуры методами рентгеноструктурного, дифференциально-термического, термогравиметрического анализа, электронной микроскопии и другими физико-химическими методами. Эти методы часто дополняют друг друга, поэтому при исследовании важно использовать несколько из них.

Структура материала сложна, поэтому ее качество можно оценить комплексом показателей. Важнейшими параметрами структуры являются истинная плотность, средняя плотность и пористость. Кроме того, к важным показателям относятся адгезия, крупность и форма зерен заполнителей и др. Зная их, можно судить о прочности, теплопроводности и других свойствах строительных материалов.

Структура материала может быть **оптимальной и неоптимальной** (по И.А. Рыбьеву).

Оптимальная структура строительного материала характеризуется:

• равномерным распределением по объему заполнителя, фаз, компонентов, пор и других составляющих ее элементов;

• отсутствием или минимальным содержанием дефектов как концентраторов напряжений или аккумуляторов агрессивной среды;

• наличием непрерывной пространственной сетки или матрицы из вяжущего вещества;

• минимальным значением отношения массы среды к массе твердой фазы (фазовое отношение);

• наибольшей плотностью упаковки твердых частиц как в микро-, так и макроструктурных частях.

Материалы с оптимальной структурой отличаются улучшенными показателями качества по сравнению с материалами с неоптимальной структурой.

Наиболее характерными особенностями структуры строительных материалов являются однородность и стабильность.

Однородность – идентичность состава и структуры материала по всему объему.

Идеально однородный материал обладает наиболее высокой прочностью.

Появление неоднородности в нем вызывает концентрацию напряжений, вследствие чего образуется микротрещина, которая развивается в критическую трещину, что и быстро разрушает материал, а прочность резко уменьшается.

Структура многих композиционных материалов является неоднородной.

В неоднородных материалах, к которым относится большинство видов бетонов и растворов в отдельных местах (поры, микротрещины, контактные слои, дефекты в кристаллах) возникают концентрации микронапряжений и микродеформаций, что при определенных воздействиях факторов внешней

среды способствует увеличению и накоплению дефектов в структуре материала. Поэтому теоретическая прочность всегда больше реальной (рис. 1.12).



Рис. 1.12. Схема зависимость теоретической прочности от неоднородности структуры строительного материала

Воздействия внешней среды (механические нагрузки и погодно-климатические факторы) постоянно изменяют структуру материалов, вызывая в них внутренние напряжения.

Стабильность – способность структуры материала сохранять установленное значение свойства в определенных пределах в течение определенного промежутка времени.

Структура материала у поверхности значительно отличается от структуры в его толще (рис. 1.13).

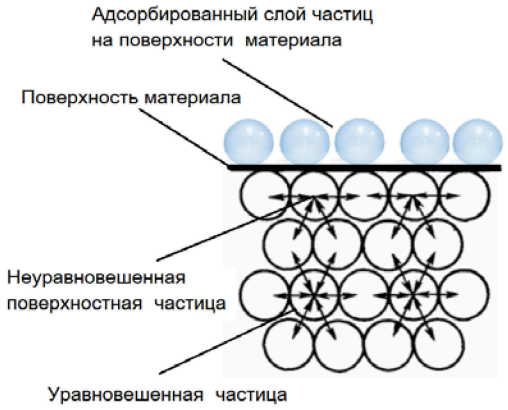


Рис. 1.13. Адсорбционный слой частиц на поверхности материала

На поверхности материала атомы и молекулы вещества не уравновешены другими микрочастицами, вследствие чего они более энергетически активны, чем аналогичные частицы внутри материала.

Именно поэтому поверхность материала всегда адсорбирует газообразные и другие вещества, что существенно изменяет свойства не только поверхностного слоя, но и материала в целом.

1.5 Классификация строительных материалов

Разнообразие строительных материалов изделий и конструкций, применяемых при возведении зданий и сооружений, вызвало необходимость их классификации по ряду признаков: происхождению, способам получения, условиям работы и др.

По происхождению строительные материалы могут быть **природные** (каменные материалы, древесина) и **искусственные** (портландцемент, стекло, керамика, бетоны, растворы).

По способам получения строительные материалы подразделяются на безобжиговые (природные каменные материалы, бетоны, растворы, гипсовые изделия), получаемые обжигом до спекания (керамические, цементный клинкер) и до плавления (стекло, каменное литье, металлы).

По назначению строительные материалы могут быть условно классифицированы на конструкционные и материалы специального назначения.

Конструкционные строительные материалы универсального типа применяются для несущих конструкций зданий и сооружений. Это природные и искусственные каменные материалы, получаемые без воздействия высоких температур на основе вяжущих веществ (бетоны, растворы) и получаемые при воздействии высоких температур на минеральное сырьё (керамика, металлы).

Строительные материалы специального назначения предназначены для повышения эксплуатационных свойств зданий и сооружений, повышения энергоэффективности, защиты конструкций от воздействия окружающей среды и создания безопасных и комфортных условий проживания человека (тепло- и гидроизоляционные, кровельные, акустические, герметизирующие, антикоррозионные, отделочные и др.).

Сложность классификации современных строительных материалов заключается в том, что один и тот же материал, в зависимости от состава и строительных характеристик, может быть отнесен к разным группам.

Особенно это касается композиционных материалов. Например, бетон, в большинстве случаев, применяют в качестве конструкционного материала, но некоторые его виды имеют иное назначение: теплоизоляционное (легкие и особо легкие бетоны), декоративное (бетоны на цветном портландцементе), специальное (особо тяжелые виды бетонов), которые служат для защиты от радиоактивного излучения.

1.6 Свойства строительных материалов

Условия эксплуатации строительных материалов с каждым годом становятся все более экстремальными вследствие изменения технической сложности объектов, роста объемов производства и загрязнения окружающей среды.

Поэтому строительные материалы должны иметь определенный гарантированный комплекс свойств и выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации.

Свойство – это качество, признак, составляющий отличительную особенность материала. Свойство материала имеет название и оценивается численным значением, которое устанавливается путем стандартного испытания.

Различают физические, механические, химические, физико-химические, технологические и эксплуатационные свойства, которые взаимосвязаны между собой и определяются составом и структурой строительного материала.

Физические свойства строительных материалов

Истинная плотность – масса единицы объема материала в абсолютно плотном состоянии без пор и пустот:

$$\rho_и = m / V_a, \quad (1.4)$$

где $\rho_и$ – истинная плотность материала, кг/м^3;
m – масса материала, кг;
V_a – объем материала в абсолютно плотном состоянии, м^3.

Истинная плотность каждого материала – постоянная физическая характеристика, которая не может быть изменена без изменения его химического состава или структуры.

Истинная плотность твердых материалов определяется с помощью пикнометра или объемомера Ле Шателье-Кандло, жидких и вязких растворов химических добавок – ареометром.

Для большинства природных и искусственных строительных материалов истинная плотность в среднем составляет 2500-3100 кг/м^3, для органических материалов – 950-1550 кг/м^3; для металлов: алюминий – 2700 кг/м^3, сталь – 7850 кг/м^3, свинец – 11300 кг/м^3.

Средняя плотность – масса единицы объема материала в естественном состоянии с порами и пустотами:

$$\rho_c = m / V_e, \quad (1.5)$$

где ρ_c – средняя плотность материала, кг/м^3;
m – масса материала, кг;

V_c – объем материала в естественном состоянии, $м^3$.

Средняя плотность строительных материалов связана с пористостью и может изменяться от 10 $кг/м^3$ (пеноизол) до 7850 $кг/м^3$ (сталь). Средняя плотность зависит от пористости и влажности материала. С увеличением влажности средняя плотность материала увеличивается. Например, средняя плотность сухой древесины (сосны) составляет 450 $кг/м^3$, а влажной может достигать значений более 950 $кг/м^3$.

Средняя плотность всегда меньше истиной плотности строительного материала (табл.1.2). Для плотных материалов, у которых пористость равна нулю, истинная и средняя плотность совпадают (стекло, металлы, битум и др.).

Таблица 1.2

Истинная и средняя плотность некоторых строительных материалов

Наименование материала	Истинная плотность, $кг/м^3$	Средняя (насыпная) плотность, $кг/м^3$
Песок кварцевый	2000-3000	1300-1600
Щебень гранитный	2000-3000	1300-1400
Щебень известняковый	2700-2900	800-2800
Гравий керамзитовый	2500-2700	150-1000
Тяжелый бетон	2600-2900	2000-2500
Легкий бетон	2600-2900	200-2000
Бетон ячеистый	2600-2900	300-1200
Кирпич керамический	2500-2700	700-2400
Стекло силикатное	2500-2600	2500-2600
Древесина сосны	1500-1600	400-600
Сталь	7800-7850	7800-7850
Цемент	3000-3200	1100-1300
Полистирол	1050-1080	300-400
Пеностекло	2500-2700	80-200
Битум	950-1500	950-1500
Пеноизол (мипора)	1100-1200	10-25

При строительных работах широко используются сыпучие (рыхлые) материалы (вяжущие вещества, песок, щебень, гравий). Для них важной характеристикой является насыпная плотность.

Насыпная плотность – это масса единицы объема сыпучего материала:

$$\rho_н = m_c / V_c, \quad (1.6)$$

где $\rho_н$ – насыпная плотность, $кг/м^3$;
m_c – масса сыпучего материала;
V_c – объем сыпучего материала.

Насыпная плотность учитывает не только пористость частиц материала, но и пустоты (пространство) между ними.

Большинство строительных материалов имеют пористое строение. Объем материала состоит из твердого вещества и пор (рис. 1.14).

Степень заполнения объема материала твердым веществом характеризуется коэффициентом плотности материала:

$$К_{пл} = (\rho_c / \rho_и), \quad (1.7)$$

где $К_{пл}$ – коэффициент плотности материала, относительные единицы;
ρ_c – средняя плотность материала, $кг/м^3$;
$\rho_и$ – истинная плотность материала, $кг/м^3$.

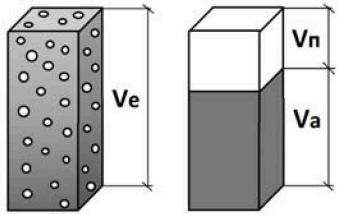


Рис. 1.14. Составные части пористого строительного материала:
V_e – объем материала в естественном состоянии; $V_п$ – объем пор;
V_a – объем твердого вещества

Коэффициент плотности равный единице имеют абсолютно плотные материалы (стекло, металлы, битум, некоторые полимеры).

Пористость – это степень заполнения объема материала порами. Зная среднюю и истинную плотности материалов, можно определить его пористость:

$$П = [1 – (\rho_c / \rho_и)]\cdot 100, \quad (1.8)$$

где П – пористость материала, %;
ρ_c – средняя плотность, $кг/м^3$;
$\rho_и$ – истинная плотность, $кг/м^3$.

Поры в материале представляют собой мелкие ячейки или каналы, заполненные воздухом или водой. Строительные материалы, как правило, содержат открытые и закрытые (замкнутые) поры (рис. 1.15). Поры в материалах могут быть крупные и мелкие, открытые и закрытые, в виде ячеек, капилляров и пр. Поры относятся к внутренним дефектам структуры материала.

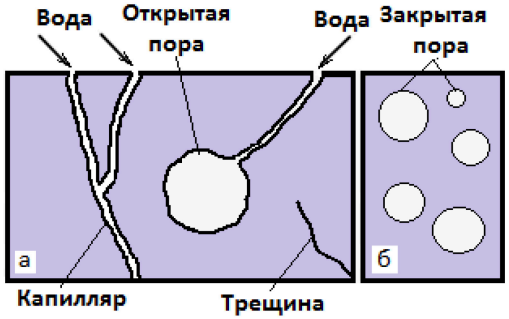


Рис. 1.15. Поры строительных материалов:
а – открытые; б – закрытые (замкнутые)

Открытая пористость характеризуется объемом пор, сообщающихся с внешней средой. К элементам открытой пористости строительных материалов относятся также капилляры и сквозные трещины.

Открытая пористость косвенно характеризуется водопоглощением материала и определяется, как отношение суммарного объема всех пор, насыщаемых водой к объему материала:

$$П_о = [(m_2 – m_1) / V_e \cdot \rho_в] \cdot 100, \quad (1.9)$$

где $П_о$ – открытая пористость материала, %;
m_1 – масса сухого образца материала, кг;
m_2 – масса образца материала, насыщенного водой, кг;
V_e – объем образца материала, $м^3$;
$\rho_в$ – плотность воды, $кг/м^3$.

Для строительных материалов, выполняющих защитные функции, количество открытых пор должно быть минимальным, в то время как для звукопоглощающих материалов специально создается открытая пористость, обеспечивающая поглощение звуковой энергии.

Зная общую и открытую пористость, можно вычислить закрытую пористость:

$$П_з = П – П_о, \quad (1.10)$$

где $П_з$ – закрытая пористость, %,
П – общая пористость, %;
$П_о$ – открытая пористость, %.

Пористость строительных материалов может меняться от 0 до 98%.

Существует несколько способов измерения пористости и анализа поверхности материала: метод газовой адсорбции, ртутной порометрии и

газодинамический метод (метод «точки пузырька»). Каждый из этих методов эффективен в определенном диапазоне. Поэтому выбор способа зависит от структуры материала, типа и формы пор.

Увеличение доли закрытой пористости за счет открытой снижает водопоглощение и повышает морозостойкость материала. Пористость также оказывает влияние на такие важные свойства строительных материалов, как средняя плотность, прочность, теплопроводность, морозостойкость, звукопоглощение и коррозионная стойкость.

Закрытые поры можно оценить только методами, разрушающими структуру материала. Образец измельчается таким образом, чтобы в нем не осталось никаких пор и пустот, и затем измеряют его плотность на гелиевом пикнометре и сравнивают полученные значения с плотностью образца до измельчения.

Для сыпучих материалов определяется объем межзерновых пустот – пустотность.

Пустотностью сыпучего материала называют отношение объема межзернового пространства материала ко всему объему, занимаемому массой материала.

Пустотность в процентах по объему вычисляют по формуле:

$$V_{мп} = [1 – (\rho_н / \rho_и)] \cdot 100, \quad (1.11)$$

где $V_{мп}$ – объем межзерновых пустот (пустотность), %;
$\rho_н$ – насыпная плотность, $кг/м^3$;
$\rho_и$ – истинная плотность, $кг/м^3$.

Пустотность рыхлых сыпучих материалов зависит от формы и размера зерен, зернового состава, влажности и температуры. Чем больше в сыпучем материале содержится одномерных зерен, тем выше его пустотность. Повышение пустотности песка и щебня приводит к увеличению расхода вяжущего (цемента, гипса) и воды в бетоне.

Гидрофизические свойства строительных материалов

В процессе эксплуатации строительные материалы подвергаются воздействию воды, водных растворов солей или водяных паров, находящихся в воздухе.

Материал, находящийся на открытом пространстве, через некоторое время впитывает влагу из воздуха.

Проникание влаги в материал может происходить в результате различных физико-химических явлений: а) поглощения влаги сорбцией; б) смачивания материала при соприкосновении его с жидкостью (капиллярное всасывание, капиллярная диффузия); в) проникания пара в материал из окружающего его воздуха (паропроницание); г) химических процессов.

Гигроскопичность – это свойство пористого материала поглощать влагу из воздуха и удерживать ее в порах и капиллярах.

Гигроскопичность имеет обратимый характер и определяется как отношение массы поглощенной влаги материала при относительной влажности воздуха 100 % и температуре 20 °С, к массе сухого материала, выраженной в процентах.

Гигроскопичность вызывается **сорбцией**, представляющей собой физико-химический процесс поглощения водяных паров из воздуха, как в результате их адсорбции на внутренней поверхности материала, так и капиллярной конденсации. Капиллярная конденсация возможна только в капиллярах с радиусом менее 10^{-7} м, так как разность давлений насыщенного водяного пара над вогнутой поверхностью мениска и плоской поверхностью в капиллярах с большим радиусом несущественна.

Гигроскопичность зависит от природы материала, его пористости и дисперсности, относительной влажности воздуха, температуры и давления. Такие строительные материалы как теплоизоляционные, обладают развитой внутренней поверхностью пор и поэтому имеют высокую сорбционную способность и, соответственно, гигроскопичность. Тонкоизмельченные порошкообразные материалы с большой удельной поверхностью, также относятся к гигроскопичным. Поглощая влагу из воздуха, такие материалы комкуются, уплотняются, а цемент и известь теряют свою активность.

Влага может находиться в строительных материалах в свободном виде (капиллярная), капельно-жидком (конденсированном), адсорбированном и химически связанном состояниях (рис. 1.16). Химически связанная влага находится в составе химических веществ, слагаемых структуру материала.

Влажность (влагосодержание) – содержание влаги в материале в данных условиях, отнесённое к массе материала в сухом состоянии. Влажность материала выражают в процентах и вычисляют по формуле:

$$W_m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100, \qquad (1.12)$$

где W_m – влажность материала, %;

m_1 – масса сухого образца, кг;

m_2 – масса влажного образца, кг.

Равновесная сорбционная влажность – это влажность материала после достижения им тепловлажностного равновесия с окружающим влажным воздухом.

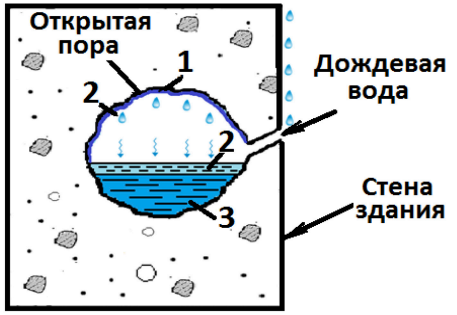


Рис. 1.16. Пора, частично заполненная водой в поверхностном слое ограждающей конструкции здания: 1 – адсорбированная вода; 2 – конденсат; 3 – свободная или капиллярная влага (дождевая вода)

Величина сорбции неодинакова для различных материалов и зависит от давления, концентрации влаги, температуры, а также природы материала. При определенном соотношении указанных условий устанавливается так называемое сорбционное равновесие. Влажностное состояние материала в этом случае называют равновесной влажностью. С повышением температуры величина сорбции уменьшается.

Влажностные деформации характеризуют изменение размеров и объема материала при изменении его влажности. К влажностным деформациям относятся усадка и набухание (разбухание).

Усадка (усушка) – уменьшение первоначальных размеров и объема материала при его высыхании. Оно вызвано уменьшением толщины слоев воды, окружающих частицы материала, и действием капиллярных сил, стремящихся их сблизить. Усадка зависит от вида материала, его пористости и структуры.

Величина усадки, например, древесной продукции при снижении влажности в процентном соотношении определяется коэффициентом усушки, который характеризует степень изменения размеров образца древесины при понижении содержания влаги на 1 %.

В различных направлениях срезов ствола полная усушка древесины тоже неодинакова и в зависимости от породы дерева составляет: линейная усадка – 0,1-0,3 % (1-3 мм на один погонный метр).

Набухание (разбухание) – увеличение первоначальных размеров и объема при его увлажнении. Оно происходит вследствие расклинивающего действия воды и уменьшения капиллярных сил в материале.

Чередование увлажнения и высыхания материала сопровождается попеременными деформациями набухания и усадки, вызывающие образование трещин, ускоряющие разрушение. В таких условиях циклических воздействий работают дорожные покрытия, опоры мостов, некоторые конструкции гидротехнических сооружений.

В капиллярные поры вода может попадать в результате капиллярного подсоса, который связан с ее поверхностным натяжением. Грунтовые воды могут подниматься по капиллярам и увлажнять фундамент, дорожное покрытие или нижнюю часть стен сооружения.

Капиллярное всасывание – свойство материала поглощать воду под действием капиллярных сил. Капиллярное всасывание характеризуется высотой поднятия воды в материале, количеством поглощенной воды и интенсивностью всасывания. Капиллярное всасывание воды пористым материалом происходит тогда, когда часть конструкции находится в воде.

Высота поднятия жидкости в капилляре определяется по формуле Жюрена:

$$h = 2\sigma \cdot \cos\theta / (r_o \cdot (p - p_o) \cdot g), \quad (1.13)$$

где h – высота поднятия жидкости в капилляре, м;
σ – поверхностное натяжение;
cosθ – краевой угол смачивания;
r_o – радиус капилляра, м;
p – плотность жидкости, кг/м^3;
p_o – плотность газовой фазы, кг/м^3;
g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Капиллярное всасывание воды в общем виде описывается уравнением:

$$M = K \cdot z^n, \quad (1.14)$$

где M – количество воды, поглощенное 1 м^2 поверхности образца от начала проведения испытания до очередного взвешивания, г/м^2;
K – коэффициент капиллярного всасывания г/(м^{2}ч$^{1/2}$);
z – промежуток времени от начала проведения испытания до очередного взвешивания, ч.

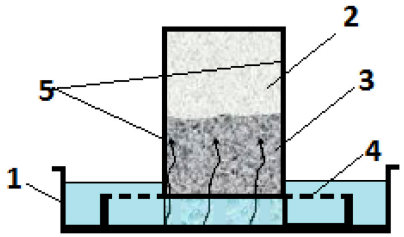


Рис. 1.17. Схема испытания образца на капиллярное всасывание:
1 – контейнер с водой; 2 – сухая часть образца; 3 – мокрая часть образца; 4 – металлическая сетка; 5 – влагоизолированные грани образца

Показателем, характеризующим капиллярное всасывание материала, является коэффициент капиллярного всасывания, определение которого проводится на образцах материала, изготовленного в виде призм высотой от 100 до 250 мм и размерами поперечного сечения 50×50 мм, установленных вертикально в контейнер с водой на металлическую сетку (рис.1.17).

Для образцов после каждого взвешивания через 5 мин от момента соприкосновения образца с водой и далее через 10 мин; 15 мин; 30 мин; 1 ч; 1,5 ч; 3 ч; 6 ч; 24 ч; 48 ч, определяют количество воды, поглощенное 1 м^2 поверхности образца, по формуле:

$$M_i = (m_1 - m_0) / F_0, \quad (1.15)$$

где M_i – количество воды, г/м^2;
m_0 – масса образца перед испытанием, кг;
m_1 – масса увлажненного образца в момент времени i, кг;
F_0 – площадь поперечного сечения образца, м^2.

Чтобы исключить капиллярное всасывание вышележащими частями конструкции, их необходимо защищать водонепроницаемым гидроизоляционным слоем. Снизить интенсивность всасывания воды порами материала возможно за счет использования гидрофобных (водоотталкивающих) добавок, применяемых на стадии получения материала или наносимых на его поверхность.

Некапиллярные поры (то есть поры с условными радиусами более 10-20 мкм) могут заполняться водой только при погружении материала в жидкость. Эти открытые поры заполняются водой постепенно и не полностью, так как этому препятствует находящийся в них воздух.

Водопоглощение – это свойство материала поглощать и удерживать в порах воду.

Водопоглощение определяют по массе и объему:

$$B_m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100, \quad (1.16)$$

где B_m – водопоглощение по массе, %;
m_1 – масса сухого образца, кг;
m_2 – масса насыщенного водой образца, кг.

$$B_v = \frac{m_2 - m_1}{V} \cdot 100, \quad (1.17)$$

где B_v – водопоглощение по объему, %;
m_1 – масса сухого образца, кг;
m_2 – масса насыщенного водой образца, кг;
V – объем образца в сухом состоянии, м^3.

Водопоглощение материалов зависит от открытой пористости и может меняться в широких пределах: 0,01-0,7% для гранита, 2-4% для тяжелого бетона, 8-15% для керамического кирпича, 100% и более для пористых теплоизоляционных материалов.

Водопоглощение материала наиболее интенсивно происходит в начальный период соприкосновения образца с водой; далее процесс стабилизируется. Водопоглощение по массе высокопористых материалов может быть больше пористости, но водопоглощение по объему не может превышать его пористость.

Водонасыщение – способность материала поглощать воду под давлением или в вакууме. В таких условиях открытые поры освобождаются от находящегося в них воздуха, и заполняются водой, поэтому водонасыщение всегда больше, чем водопоглощение.

Увлажнение пористого материала может менять такое его свойства, как прочность. Вода, проникая в поры материала, постепенно растворяет кристаллические частицы, вследствие чего адгезия между ними нарушается или ослабевает, что в итоге приводит к понижению прочности.

Водостойкость – свойство материала сохранять свои эксплуатационные свойства при длительном воздействии воды.

Показателем водостойкости является **коэффициент размягчения (водостойкости)**:

$$K_р = R_в / R_с, \qquad (1.18)$$

где $K_р$ – коэффициент размягчения (водостойкости);

$R_в$ – прочность при сжатии материала в насыщенном водой состоянии, МПа;

$R_с$ – прочность при сжатии материала в сухом состоянии, МПа.

Коэффициент размягчения меняется от нуля (гипс, известь, глинистые необожженные материалы) до единицы (сталь, стекло). Каменные природные и искусственные материалы с коэффициентом размягчения более 0,8 называются водостойкими.

Водопроницаемость – свойство материала пропускать воду под давлением. Водопроницаемость оценивается коэффициентом фильтрации:

$$K_ф = V_в \cdot a / [S \cdot (p_1 - p_2) \cdot t], \qquad (1.19)$$

где $K_ф$ – коэффициент фильтрации, м/ч;

$V_в$ – количество воды в $м^3$, проходящее через стенку, площадью $S = 1 м^2$, толщиной $a = 1$ м за время $t = 1$ ч;

S – площадь фильтрации, при разности гидростатического давления на границах стенки ($p_1 - p_2$), равной 1 м водяного столба.

Для гидротехнических бетонов, гидроизоляционных и кровельных материалов водонепроницаемость является важнейшим показателем их

качества.

Водонепроницаемость связана не только с плотностью материала, но и с особенностями капиллярно-порового пространства, поскольку скорость движения воды в капиллярах зависит главным образом от их диаметра. Материалы с микрокапиллярной структурой не пропускают воду даже под значительным давлением. Этим, в частности, можно объяснить водонепроницаемость тонкодисперсных глин. Скорость фильтрации воды в несколько раз понижается и в капиллярах переменного сечения.

Водонепроницаемость материала (бетона) характеризуется маркой, обозначающей одностороннее гидростатическое давление, при котором образец-цилиндр не пропускает воду в условиях стандартного испытания.

По водонепроницаемости тяжелые и мелкозернистые бетоны подразделяются на следующие марки W2, W4, W6, W8, W10, W12, W14, W16, W18, W20. Водонепроницаемость определяется методом «мокрого пятна» на образцах диаметром 150 мм и высотой 150, 100, 50 и 30 мм. Давление воды повышают ступенями по 0,2 МПа в течение 1-5 мин и выдерживают на каждой ступени в течение времени в зависимости от размера образца. Испытание проводят до тех пор, пока на верхней торцевой поверхности образца появятся признаки фильтрации воды в виде капель или мокрого пятна. Водонепроницаемость каждого образца оценивают максимальным давлением воды, при котором еще не наблюдалось ее просачивание через образец.

Паропроницаемость – свойство материала пропускать через свою толщу или задерживать водяной пар.

Паропроницаемость – это величина, численно равная количеству водяного пара в миллиграммах, проходящего за 1 ч через слой материала площадью 1 $м^2$ и толщиной 1 м при условии, что температура воздуха у противоположных сторон слоя одинаковая, а разность парциальных давлений водяного пара равна 1 Па.

При строительстве практическое значение имеет сравнительная оценка коэффициентов паропроницаемости для правильного выбора стеновых и отделочных материалов, и их сочетания в многослойных конструкциях стен современных домов.

Коэффициент паропроницаемости материала – это расчетный теплотехнический показатель, определяемый как отношение толщины образца материала $d_к$ сопротивлению паропроницанию $R_п$, измеренному при установившемся стационарном потоке водяного пара через этот образец.

Паропроницаемость зависит от структурных характеристик материала, плотности и пористости (табл. 1.3). Показатель, характеризующий разность парциальных давлений водяного пара в паскалях у противоположных сторон изделия с плоскопараллельными сторонами, при которой через изделие площадью 1 $м^2$ за 1 ч проходит 1 мг водяного пара при равенстве температуры воздуха у противоположных сторон изделия; величина, численно равная отношению толщины слоя испытуемого материала к значению паропроницаемости.

Таблица 1.3

Коэффициенты паропроницаемости материалов

Материал	μ, мг/(м·ч·Па)	Материал	μ, мг/(м·ч·Па)
Бетон легкий Бетон ячеистый Арболит Кирпич керамический Сосна и ель вдоль волокон	0,09-0,7 0,08-0,35 0,07-0,16 0,11-0,17 0,32	Пенопласт Полистиролбетон Сосна и ель поперек волокон Минеральная вата	0,05-0,23 0,051-0,176 0,06 0,3-06

Сопротивление паропроницанию определяют для листовых и пленочных строительных материалов толщиной менее 10 мм, а также для тонкослойных покрытий (тонкие штукатурные слои систем наружного утепления; кровельные рулонные материалы; лакокрасочные, пароизоляционные покрытия и т.п.). Для остальных материалов определяют паропроницаемость.

Для расчета сопротивления паропроницанию используют полученные значения плотности потока водяного пара через образец, значения упругости водяного пара в воздухе камеры и в испытательном сосуде под образцом (давление насыщенного водяного пара и давление водяного пара в камере вокруг испытательного сосуда).

Точка росы – это температура, до которой должен охладиться воздух, чтобы конденсироваться в пар, а затем в росу. В холодное время года возрастает парциальное давление, тёплый воздух, под действием разницы давлений влага устремляется в более холодную зону, в толщу утеплителя, и в результате внутренней миграции концентрируется на поверхностях раздела сред (рис. 1.18).

Относительная влажность воздуха в жилых помещениях в зависимости от времени года составляет от 30 до 60 %, во влажных помещениях, например, в ванной комнате до 100 %.

Современные наружные стены – это многослойные конструкции, в которых помимо основного конструкционного материала присутствуют утеплители, декоративные и отделочные слои покрытия, которые или уменьшают, или сохраняют паропроницаемость основных строительных материалов. Поэтому многое зависит от характеристик сопротивления паропроницаемости различных слоев стены здания.

Перенос тепла всегда возникает при разности температур на наружных и внутренних поверхностях ограждения. При понижении температуры наружного воздуха, миграция воды в материале ограждающей конструкции здания направлена от теплой к охлаждаемой поверхности бетона. Вследствие этого, увеличивается насыщение водой пор вблизи наружной поверхности, что обусловливает разрушение, в первую очередь, наружных отделочных слоев конструкции здания.

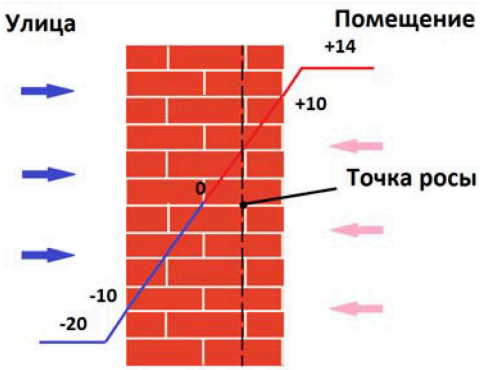


Рис. 1.18. Точка росы в наружной стене здания из керамического кирпича

Хорошей паропроницаемостью обладают современные ячеистобетонные стеновые материалы. Однако необходимо учитывать, что на величину паропроницаемости значительное влияние оказывает влажность материалов. При достижении материалом определенного порога влагонасыщения, диффузионные процессы практически прекращаются, что уменьшает их теплозащитные качества и увеличивает теплопотери. Кроме того, переувлажнение ограждающих конструкций может привести к отслоению отделочных слоев, их разрушению и сокращению срока службы.

Морозостойкость – свойство материала в водонасыщенном или насыщенном раствором соли состоянии выдерживать многократное замораживание и оттаивание без внешних признаков разрушения (трещин, сколов, шелушения), снижения прочности, изменения массы и других его технических характеристик.

Одно замораживание и последующее оттаивание составляют один цикл испытания на морозостойкость.

Для определения морозостойкости бетона, насыщенные водой образцы извлекают из воды, помещают в морозильную камеру так, чтобы расстояние между образцами, стенками контейнера было не менее 20 мм. Включают камеру и понижают температуру. Началом замораживания считают момент установления в камере температуры минус 15 °С для керамических и силикатных изделий и минус 16 °С для бетонов.

Основная причина разрушения материала под действием низких температур – расширение воды, заполняющей поры материала, при замерзании.

При замерзании воды в порах материала и переходе ее в лед, с увеличением объема почти на 9 %, происходят изменения в поровом пространстве, ранее заполненном воздухом и/или водой. При постепенном замораживании, вследствие образующегося гидравлического давления воды на стенки пор-капилляров материала при фазовом переходе ее в лед, происходит перемещение воды к поверхностям, имеющим более низкую температуру, чем его внутренние части.

При отсутствии пространства, не занятого водой, увеличение объема замерзшей воды создает общее кристаллизационное давление льда, приводящее к появлению микротрещин, постепенно переходящих в макротрещины и в последствии, особенно, при многократно повторяющихся процессах замораживания-оттаивания, к разрушению материала (рис. 1.19).

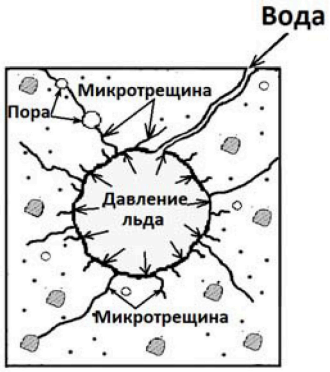


Рис. 1.19. Схема образования микротрещин при замерзании воды в открытой поре бетона

Морозостойкость зависит главным образом от структуры материала: чем выше относительный объём пор, доступных для проникновения воды, тем ниже морозостойкость.

Воздействие на строительные материалы попеременного замораживания и оттаивания сравнивают с многократным воздействием повторяющейся растягивающей нагрузке, вызывающей усталость материала.

Морозостойкость материала количественно оценивается маркой по морозостойкости, за которую принимают наибольшее число циклов попеременного замораживания и оттаивания, при котором характеристики материала остаются в нормированных пределах, а также отсутствуют трещины, сколы, шелушение ребер.

Морозостойкость материала оценивается по степени повреждений после проведения определенного числа циклов замораживания-оттаивания, по потере массы и прочности при сжатии.

Среднее максимально допустимое уменьшение массы образцов, например, бетона не должно превышать 2 %. Для легкого бетона допускается уменьшение средней прочности не более 15 %.

По морозостойкости бетоны подразделяются на марки от F50 до F1000, керамические материалы от F25 до F300, силикатные изделия – от F25 до F100.

Повышение морозостойкости строительных материалов достигается за счет уменьшения доли открытой, доступной для воды пористости (при повышении плотности) и увеличения объема закрытых пор размерами менее 0,5 мм, заполненных воздухом, которые являются амортизаторами напряжений,

появляющихся при замерзании воды.

Гарантированная морозостойкость бетона обеспечивается в том случае, если величина закрытой пористости находится в пределах 5-6 %. При значениях параметра закрытой пористости менее 3 % наблюдается существенное снижение морозостойкости, хотя прочность при этом может повыситься. При величине закрытой пористости более 6 % возможно снижение прочности бетона по сравнению с проектной. Получение бетона с проектной прочностью при таких ее значениях приводит к неоправданному увеличению расхода цемента.

От морозостойкости в большой степени зависит долговечность материалов.

Теплофизические свойства строительных материалов

Теплопроводность – свойство строительного материала передавать тепло сквозь свою толщу от одной поверхности к другой. Теплопроводность характеризуется количеством теплоты, которое способен передать материал через 1 м^2 поверхности при толщине 1 м и разности температур на поверхностях 1К в течение 1 с. Теплопроводность характеризуется коэффициентом теплопроводности λ.

Теплопроводность материалов зависит от пористости, влажности, средней плотности, температуры, их химического состава и степени кристаллизации. Чем сложнее химический состав и ближе структура материала к аморфной, тем меньше теплопроводность. Теплопроводность аморфных материалов всегда меньше, чем кристаллических материалов.

Структура материала также влияет на коэффициент теплопроводности. Так при слоистом или волокнистом строении материала, с определенной направленностью волокон, коэффициент теплопроводности зависит от направления потока тепла по отношению к ним. У древесины, например, волокна которой вытянуты вдоль оси ствола, коэффициент теплопроводности вдоль волокон почти в 2 раза больше, чем поперек волокон.

Чем меньше значение коэффициента теплопроводности имеет материал ограждения, тем выше его теплоизоляционные свойства и наоборот, чем больше величина (λ), тем большую теплопроводность имеет материал ограждения. Пористые материалы, как правило, содержат большое количество воздушных пор.

У пористых материалов тепловой поток проходит через твердую часть и поры, заполненные воздухом.

Теплопроводность воздуха очень низкая (λ = 0,023Вт/(м·°С)), вследствие чего он оказывает большое термическое сопротивление прохождению теплового потока.

Коэффициент теплопроводности сухих пористых материалов является промежуточной величиной между коэффициентами теплопроводности их компонентов и воздуха: чем больше пористость (то есть чем меньше средняя

плотность материала), тем ниже коэффициент теплопроводности, и наоборот. Таким образом, наиболее эффективными для ограждающих конструкций являются легкие материалы.

При этом мелкопористые материалы менее теплопроводны, чем крупнопористые. Материалы с замкнутыми порами имеют меньшую величину λ, чем материалы с сообщающимися порами. Это связано с тем, что в крупных и сообщающихся порах возникает движение воздуха, сопровождающееся переносом тепла (явление конвекции) и повышением суммарного коэффициента теплопроводности. Минимальному увлажнению способствует закрытая пористость, гидрофобность материала и конструктивная защита теплоизоляции от увлажнения.

Величина теплопроводности характеризуется коэффициентом теплопроводности. Единицы измерения теплопроводности – [Вт/(м·К)] или [Вт/(м·°С)]. Чем меньше коэффициент теплопроводности, тем меньше потери тепла при одной и той же толщине материала и одинаковых климатических условиях.

Для воздушно-сухих материалов (то есть имеющих влажность 1-7 % по объему) величину коэффициента теплопроводности можно ориентировочно определить по относительной плотности, пользуясь эмпирической формулой, предложенной профессором В.П. Некрасовым:

$$\lambda = 1{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0196 + 0{,}22 \cdot d^2} - 0{,}16, \qquad (1.20)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);
d – относительная плотность материала.

Более точное значение коэффициента теплопроводности материалов определяется экспериментально.

Влага, попадая в поры материала, увеличивает его теплопроводность, потому, что при увлажнении происходит вытеснение сухого воздуха из пор материала и замещение его водой или влажным воздухом, теплопроводность которых значительно выше. У воды λ = 0,599 Вт/(м·°С), то есть в 25 раз больше, чем у воздуха. При замерзании воды в порах материала коэффициент теплопроводности еще в большей степени увеличивается, так как λ льда составляет 2,3 Вт/(м·°С), что в 4 раза больше, чем теплопроводность воды (рис. 1.20).



Рис. 1.20. Зависимость коэффициента теплопроводности неорганических материалов от средней плотности: 1 – сухие материалы; 2 и 3 – воздушно-сухие материалы с различной влажностью; 4 – материалы, насыщенные водой

Показатели коэффициента теплопроводности некоторых веществ и материалов представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Коэффициенты теплопроводности некоторых веществ и материалов

Материал	λ, Вт/(м·°С)	Материал	λ, Вт/(м·°С)
Бетон легкий	0,09-0,7	Полистиролбетон	0,054-0,176
Бетон ячеистый	0,08-0,35	Минеральная вата (25 °С)	0,038-0,04
Арболит	0,07-0,16	Маты базальтовые (25 °С)	0,036-0,038
Кладка из кирпича керамического	0,2-0,46	Вода (20 °С)	0,599
Пеностекло (25 °С)	0,045-0,065	Лед (0 °С)	0,916

Знание теплопроводности материалов, необходимо при теплотехнических расчётах ограждающих конструкций зданий (стен, перекрытий), тепловой изоляции трубопроводов. Чем ниже значения коэффициента теплопроводности материала, тем меньше толщина изолирующих материалов.

Применение инновационных теплоизоляционных материалов с коэффициентом теплопроводности 0,05 Вт/(м·°С) позволяет получить значительный технико-экономический эффект за счет снижения толщины ограждающих конструкций или снижения энергетических затрат на отопление зданий.

Теплоёмкость – свойство материала поглощать тепло при нагревании на один Кельвин. Оценивается теплоемкость показателем удельной теплоемкости (с), который характеризуется количеством тепла, которое необходимо сообщить 1 кг материала, чтобы повысить его температуру на 1 К. Единицы измерения – кДж/(кг·К), кДж/(кг·С).

Для воздуха с = 0,97 кДж/(кг·К), для воды с = 4,2 кДж/(кг·К). Поэтому с повышением содержания влаги в пористых материалах их удельная теплоемкость увеличивается.

Теплоемкость материалов зависит от их химического состава, структуры, температуры и влажности и меняется от 0,12 для гипсокартона до 0,44 ккал/кг·°С для абсолютно сухой древесины. Наибольшую теплоемкость имеет вода – 4,19 ккал/кг·°С, поэтому при повышении влажности материала его теплоемкость возрастает.

Для ограждающих конструкций зданий и сооружений желательно применять материалы с возможно более высоким коэффициентом теплоемкости.

Сопротивление теплопередаче (R_o) – это отношение толщины стены к коэффициенту теплопроводности материала.

Пожарная опасность строительных материалов – это совокупность пожароопасных свойств строительных материалов, определяющих возможность возникновения и развития пожара (горения).

Основным фактором, определяющим пожарную опасность материалов, является сырье, из которого они изготовлены. В этой связи их можно разделить на три большие группы: неорганические, органические и комбинированные.

Наиболее часто встречающиеся минеральные строительные материалы – это природный камень, бетон, кирпич, керамика, хризотилцемент, стекло и т.д. Они относятся к негорючим (НГ), но даже при небольшом добавлении полимерных или органических веществ (не более 5-10 % от массы) их свойства меняются. Увеличивается пожарная опасность, и из НГ они переходят в категорию трудносгораемых.

Из всех органических материалов наибольшее распространение при строительстве современных зданий получили полимерные и материалы и изделия из древесины – древесно-стружечные плиты (ДСП), древесно-волокнистые плиты (ДВП), модифицированная фанера и т.д. Все органические материалы относятся к группе горючих и для снижения их пожарной опасности их обрабатывают антипиренами.

Основными техническими показателями пожарной опасности строительных материалов, изделий и конструкций являются:

- горючесть;
- воспламеняемость;
- скорость распространения пламени по поверхности;
- дымообразующая способность;
- токсичность продуктов горения.

Горючесть – свойство, характеризующее способность материала гореть.

Строительные материалы по горючести подразделяются на две основные группы: негорючие (НГ) и горючие (Г).

Негорючие – материалы, не способные к горению на воздухе. Для негорючих строительных материалов другие показатели пожарной опасности не определяются и не нормируются. К негорючим строительным материалам

относят в основном минеральные материалы (бетоны, растворы, керамика, стекло и др.).

Горючие – вещества и материалы, способные самовозгораться, а также возгораться от источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления.

Горючие строительные материалы подразделяются на следующие группы:

- слабогорючие (Г1), имеющие температуру дымовых газов не более 135 °С, степень повреждения по длине испытываемого образца не более 65 %, степень повреждения по массе испытываемого образца не более 20 %, продолжительность самостоятельного горения 0 с;
- умеренногорючие (Г2), имеющие температуру дымовых газов не более 235 °С, степень повреждения по длине испытываемого образца не более 85 %, степень повреждения по массе испытываемого образца не более 50 %, продолжительность самостоятельного горения не более 30 с;
- нормальногорючие (Г3), имеющие температуру дымовых газов не более 450 °С, степень повреждения по длине испытываемого образца более 85 %, степень повреждения по массе испытываемого образца не более 50 %, продолжительность самостоятельного горения не более 300 с;
- сильногорючие (Г4), имеющие температуру дымовых газов более 450 °С, степень повреждения по длине испытываемого образца более 85 %, степень повреждения по массе испытываемого образца более 50 %, продолжительность самостоятельного горения более 300 с.

Воспламенение – пламенное горение вещества, инициированное источником зажигания и продолжающееся после его удаления.

Самовоспламенение – резкое увеличение скорости экзотермических объемных реакций, сопровождающееся пламенным горением и/или взрывом.

По воспламеняемости горючие строительные материалы в зависимости от величины критической поверхностной плотности теплового потока подразделяются на следующие группы: трудновоспламеняемые (В1); умеренновоспламеняемые (В2); легковоспламеняемые (В3).

По скорости распространения пламени по поверхности горючие строительные материалы в зависимости от величины критической поверхностной плотности теплового потока подразделяются на следующие группы:

- нераспространяющие (РП1);
- слабораспространяющие (РП2);
- умереннораспространяющие (РП3);
- сильнораспространяющие (РП4).

По дымообразующей способности горючие строительные материалы в зависимости от значения коэффициента дымообразования подразделяются на следующие группы:

- с малой дымообразующей способностью (Д1);
- с умеренной дымообразующей способностью (Д2);

- с высокой дымообразующей способностью (Д3).

По токсичности продуктов горения горючие строительные материалы подразделяются на следующие группы:

- малоопасные (Т1);
- умеренноопасные (Т2);
- высокоопасные (Т3);
- чрезвычайно опасные (Т4).

Классы пожарной опасности в зависимости от групп пожарной опасности строительных материалов приведены в таблице 1.5, а перечень показателей, необходимых для оценки пожарной опасности строительных материалов в таблице 1.6.

Таблица 1.5

Классы пожарной опасности строительных материалов

Свойства пожарной опасности строительных материалов	Класс пожарной опасности строительных материалов в зависимости от групп					
	КМО	КМ1	КМ2	КМ3	КМ4	КМ5
Горючесть	НГ	Г1	Г1	Г2	Г3	Г4
Воспламеняемость	-	В1	В2	В2	В2	В3
Дымообразующая способность	-	Д2	Д2	Д3	Д3	Д3
Токсичность продуктов горения	-	Т2	Т2	Т2	Т3	Т4
Распространения пламени	-	РП1	РП1	РП2	РП2	РП4

Степень огнестойкости здания (сооружения) определяется степенью возгораемости и пределом огнестойкости его основных конструкций и материалов и проектируется в соответствии с классом функциональной пожарной опасности здания (сооружения).

Строительные конструкции зданий и сооружений в зависимости от их способности сопротивляться воздействию пожара и распространению его опасных факторов подразделяются на строительные конструкции со следующими пределами огнестойкости: ненормируемый; не менее – 15 мин, 30 мин, 45 мин, 60 мин, 90 мин, 120 мин, 150 мин, 180 мин, 240 мин, 360 мин.

Пределы огнестойкости строительных конструкций определяются в условиях стандартных испытаний. Наступление пределов огнестойкости несущих и ограждающих строительных конструкций в условиях стандартных испытаний или в результате расчетов устанавливается по времени достижения одного или последовательно нескольких из следующих признаков предельных состояний:

- потеря несущей способности (R);
- потеря целостности (E);
- потеря теплоизолирующей способности вследствие повышения температуры на необогреваемой поверхности конструкции до предельных значений (I) или достижения предельной величины плотности теплового потока на нормируемом расстоянии от необогреваемой поверхности конструкции (W).

Таблица 1.6

Перечень показателей, необходимых для оценки пожарной опасности строительных материалов

Назначение строительных материалов	Перечень необходимых показателей в зависимости от назначения строительных материалов				
	группа горючести	группа распространения пламени	группа воспламеняемости	группа по дымообразующей способности	группа по токсичности продуктов горения
Материалы для отделки стен и потолков, в том числе покрытия из красок, эмалей, лаков	+	-	+	+	+
Материалы для покрытия полов, в том числе ковровые	-	+	+	+	+
Кровельные материалы	+	+	+	–	–
Гидроизоляционные и пароизоляционные материалы толщиной более 0,2 миллиметра	+	–	+	–	–
Теплоизоляционные материалы	+	–	+	+	+

Примечания: 1. Знак «+» обозначает, что показатель необходимо применять.
2. Знак «–» обозначает, что показатель не применяется.

В процессе эксплуатации не допускается фактическое снижение огнестойкости конструкций, возникающее в связи с их неудовлетворительным техническим состоянием: наличие трещин, повреждение огнезащитного слоя и др.

Огнеупорность – свойство материала выдерживать длительное воздействию высокой температуры (от 1580 °С и выше) не расплавляясь. Огнеупорность материала зависит от состава и определяется температурой деформации образца – пироскопа при определенных условиях нагрева и размеров.

В зависимости от огнеупорности строительные материалы подразделяются на группы: огнеупорные (от 1580 до 1770 °С), высокоогнеупорные (свыше 1770 до 2000 °С) и высшей огнеупорности (свыше 2000 °С).

Огнеупорные материалы применяются в агрегатах и промышленных установках для защиты от воздействия тепловой энергии и агрессивных реагентов (газовых, жидких, твердых).

Температурное расширение – относительное приращение длины образца, вызванное повышением его температуры на один градус.

Коэффициентом линейного теплового расширения (КЛТР) называют физическую величину, характеризующую относительное приращение длины

образца, вызванное повышением его температуры на один градус.

При положительной величине ТКЛР в процессе нагрева материал увеличивается в размерах (расширяется), при отрицательном значении этого коэффициента – сжимается.

Для бетона коэффициент линейного теплового расширения равен 10×10^{-6} – 14×10^{-6} °C^{-1}, стали $9{,}9\times10^{-6}$ °C^{-1} – $17{,}3\times10^{-6}$ °C^{-1}, поливинилхлорида $50{,}4\times10^{-6}$ °C^{-1}, кварца $0{,}77\times10^{-6}$ °C^{-1} – $1{,}4\times10^{-6}$ °C^{-1}, керамического кирпича $5{,}5\times10^{-6}$ °C^{-1}.

Величина ТКЛР зависит от состава, из которого изготовлен материал (рис. 1.21). Для бетона с увеличением содержания цементного камня температурный коэффициент линейного теплового расширения увеличивается.

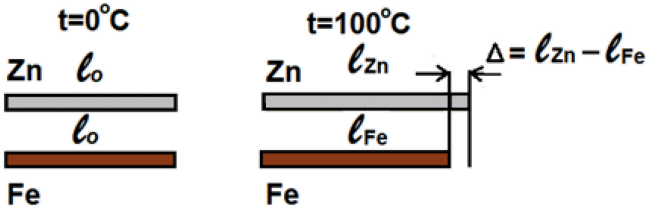


Рис.1.21. Относительное удлинение образцов цинка и железа при нагревании от 0 до 100 °C

При сезонном изменении температуры окружающей среды в материале на 50 °C относительная температурная деформация достигает $0{,}5\times10^{-3}$ или 1×10^{-3}, то есть 0,5-1 мм/м. Для предотвращения растрескивания конструкции большой протяженности (мостов, дорожных покрытий) разрезают деформационными швами.

Специальные физические свойства строительных материалов

Для защиты от шума и создания условий акустического комфорта в строительных конструкциях жилых, общественных и производственных зданий, применяются звукоизоляционные и звукопоглощающие материалы и изделия.

Звукоизоляционным называется материал, характеризующийся вязкоупругими свойствами и обладающий динамической жесткостью не более 250 МПа/м.

Звукопоглощающим называется материал, имеющий сквозную пористость и характеризуемый относительно высоким коэффициентом звукопоглощения ($\alpha > 0{,}2$).

Коэффициент звукопоглощения определяется как отношение неотраженного потока звуковой энергии к потоку звуковой энергии падающего на материал или изделие звука.

Звукопоглощающие материалы предназначены для применения в качестве поглощающего слоя в конструкциях облицовок внутренних

поверхностей помещений и шумозащитных сооружений с целью снижения интенсивности отражения звуковых волн, а также в конструкциях легких многослойных ограждений с целью улучшения изоляции воздушного шума.

Степень поглощения звука материалом зависит от его структуры, величины и характера пористости и толщины конструкции. Звукопоглощение усиливается в полужестком и особенно упругом каркасе материала за счет деформаций самого каркаса. Коэффициент звукопоглощения более 0,8 считается высоким, менее 0,2 – низким.

С возрастанием количества пор преимущественно сообщающегося разветвленного характера и с увеличением шероховатости поверхности возрастает звукопоглощение материала. При наличии открытых сравнительно крупных пор материал поглощает больше звуковой энергии, чем мелкопористый с замкнутыми порами, аналогичного состава.

Радиационная стойкость – это способность материала сохранять состав, структуру и значения показателей в процессе и (или) после радиационного воздействия (электронного, протонного, нейтронного и гамма-излучений).

Радиационная стойкость материала зависит от многих факторов: вида радиации, величины и мощности поглощенной дозы, режима облучения (непрерывное или импульсное, кратковременное или длительное), условий эксплуатации материала (температура, высокое давление, механические нагрузки, магнитное или электрическое поле), размеров образца материала, его удельной поверхности и др.

В результате радиационного воздействия на материалы могут произойти глубокие структурные изменения, связанные, например, в полимерных материалах с разрывом главной цепи макромолекулы или узлов пространственной сетки.

Возможна также радиационная аморфизация материала, приводящая к пространственному разупорядочению макромолекул и исчезновению дальнего порядка.

Толщина слоя материала, уменьшающая уровень радиации в два раза, называется **слоем половинного ослабления,** который уменьшает интенсивность излучения в 2 раза. Два таких слоя ослабят излучение в 4 раза, и каждый последующий слой будет дополнительно ослаблять излучение вдвое.

Для защиты от гамма-излучения используются материалы повышенной плотности – особо тяжелые бетоны, с заполнителями из свинцовой и чугунной дроби, крошки и скрапа (крупного лома), магнетита (Fe_3O_4), барита ($BaSO_4$) и др.

Достаточно широкое распространение для защиты от различных видов излучений получили полимерные материалы и многослойные композиты на их основе.

Удельная эффективная активность естественных радионуклидов (ЕРН) – это суммарная удельная активность ЕРН в материале, определяемая по формуле:

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1{,}31A_{Th} + 0{,}085A_K, \quad (1.21)$$

где $A_{эфф}$ – удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг;

A_{Ra}, A_{Th}, A_K – удельные активности радия, тория, калия соответственно, Бк/кг.

Перераспределяясь и концентрируясь в процессе технологической переработки естественные радионуклиды, вносимые природным и техногенным сырьем, способны образовывать соединения, которые в процессе эксплуатации могут мигрировать из структуры строительных материалов в окружающую среду, создавая опасные для человека концентрации в воздухе и воде.

Критерии для принятия решения об использовании материалов в строительстве приводятся в табл. 1.7 (ГОСТ 30108).

Содержание ЕРН в материалах характеризуется большим разбросом показаний по $A_{эфф}$ (от 7 до 4700 Бк/кг) (табл. 1.8).

Таблица 1.7

Критерии использования строительных материалов

Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, $A_{эфф}$, Бк/кг	Класс материала	Область применения
до 370	I	Все виды строительства
370-740	II	Дорожное строительство в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки, строительство производственных сооружений
740-1500	III	Дорожное строительство вне населенных пунктов
1500-4000	IV	Вопрос об использовании материала решается по согласованию с Госкомсанэпиднадзором

Для композиционных строительных материалов (бетонов, растворов) эффективная удельная активность ЕРН может быть определена расчетным путем в зависимости от эффективной удельной активности естественных радионуклидов в исходных компонентах и их массовой доле в композите:

$$A_{эфф} = \sum_{i=1}^{n} (A_{эфф1} \cdot q_1 + A_{эфф2} \cdot q_2 + \ldots + A_{эффn} \cdot q_n) / (q_1 + q_2 + \ldots q_n), \quad (1.22)$$

где $A_{эфф1}$, $A_{эфф2}$, $A_{эффn}$ – эффективные удельные активности компонентов материала, Бк/кг;

q_1, q_2, q_n – массовая доля компонентов материала, доли единицы.

Таблица 1.8

Содержание естественных радионуклидов в материалах

Наименование материала	Удельная активность, Бк/кг			Эффективная удельная активность, $A_{эфф}$, Бк/кг
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	
Тяжелый бетон на гранитном щебне	38,6±12	43,1±11	603,1±8	146±18
Керамзитобетон	39,8±12	31,0±7	456,8±6	119±15
Золобетон	58,9±30	48,2±11	153,7±9	135±33
Гипсобетон	12,1±6	0,88±3	140±8	25±7
Пенобетон	36,8±23	13,4±10	170,5±7	69±26
Асфальтобетон песчаный	35,5±13	42,0±13	810,8±8	159±20
Сухая строительная смесь	19,7±20	12,1±16	7,5±23	36±34
Кирпич керамический	49,5±36	55,9±11	705,4±8	183±38
Плитка керамическая	79,7±12	57,0±9	1155,1±7	253±17
Базальтовое волокно	39,2±40	57,8±9	412±7	150±42

Примечание: материалы Брянского региона.

При тепловых процессах, сопровождающихся сушкой и диссоциацией глинистых, карбонатных и других горных пород, содержание ЕРН возрастает пропорционально потере массы материалов за счет концентрирования естественных радионуклидов обычно в 1,1-3,8 раза (табл. 1.9).

Таблица 1.9

Содержание естественных радионуклидов в материалах при тепловых процессах

Наименование материала	Коэффициент концентрирования	Наименование материала	Коэффициент концентрирования
Кирпич керамический	1,1-1,3	Цементный клинкер	1,4-1,6
Стекло	1,6-1,9	Зола	2,6-6,6
Базальтовое волокно	1,6-1,8	Шлак	1,8-6,4

Для оценки концентрирования ЕРН в материалах, полученных высокотемпературной обработкой, используется коэффициент концентрирования $K_к$:

$$K_к = A_{эффд} / A_{эффп}, \quad (1.23)$$

где $A_{эффд}$ и $A_{эффп}$ – эффективные удельные активности ЕРН до и после высокотемпературной обработки (спекания, плавления), относительные единицы.

Установлено, что естественные радионуклиды могут содержаться в природном и техногенном сырье в различных формах. В ряде случаев происходит изоморфное замещение ионов кремния и возможно алюминия и железа ионами тория и радия. При этом радионуклиды распределяются в объеме частиц заполнителя, поэтому практически не поддаются удалению.

В ряде случаев естественные радионуклиды адсорбируются совместно с соединениями Fe^{3+}, Al^{3+} и др. на поверхности кварцевых частиц, в трещинах и порах, или в составе тонкодисперсной глинистой фракции. При этом можно в значительной степени понизить их содержание отмывкой водой или слабыми растворами кислот.

При отмывке водой, например, кварцево-глауконитового песка эффективная удельная активность естественных радионуклидов уменьшается на 30-33 %, а при промывании слабым раствором соляной кислоты 0,03-0,3 % – на 50-56 %.

Рекомендуемыми способами снижения содержания естественных радионуклидов в сырьевых компонентах являются: отсев и удаление мелких фракций, промывка водой и слабой соляной кислотой, которые позволяют снизить их концентрацию более чем в 2 раза.

Механические свойства

Механические свойства строительных материалов определяют поведение конструкций под действием внешних нагрузок, которые вызывают деформацию или разрушение материалов.

Сопротивление строительных материалов механическому разрушению характеризуется их прочностными свойствами: прочность на сжатие, изгиб, растяжение, срез (сдвиг), истираемость, сопротивление удару, твердость и др.

Способность материалов изменять под нагрузкой форму и размеры оценивается деформационными свойствами: упругостью, пластичностью, хрупкостью и ползучестью.

Механические свойства строительных материалов разделяются на деформативные и прочностные.

Деформативные свойства

Деформационные свойства – эти свойства, характеризующие способность материала изменять первоначальные размеры, форму или объем без изменения массы под действием нагрузок или других воздействий (температура, влажность).

В результате механических воздействий строительные материалы деформируется, проявляя свойства упругости или пластичности.

Деформация – это изменение формы и размеров материала, под действия внешних нагрузок, при изменении температуры, влажности, фазовых превращениях и других воздействиях.

Если внешние усилия невелики, деформация является упругой, т.е. после снятия нагрузки материал возвращается к прежним размерам. Если нагрузка достигает значительной величины, кроме упругих деформаций развиваются пластические, приводящие к необратимому изменению формы и размеров.

Упругость – свойство материала деформироваться под нагрузкой и восстанавливать первоначальную форму и размеры после прекращения действия внешней силы.

Внешние силы, воздействующие на материал, вызывают изменение межатомных расстояний, поэтому меняются его размеры в направлении действия силы. Деформация сопровождается удалением атомов друг от друга или их приближением. Поэтому при растяжении происходит удлинение деформируемого материала, а при сжатии – уменьшение.

Отношение абсолютной деформации Δl к первоначальному линейному размеру материала l называется относительной деформацией:

$$\varepsilon = \Delta l / l, \qquad (1.24)$$

где ε – относительная деформация, относительные единицы;
Δl – абсолютная деформация, м;
l – первоначальный линейный размер материала, м.

При упругой работе материала справедлив закон Гука:

$$\varepsilon = \sigma / E, \qquad (1.25)$$

где ε – относительная деформация, относительные единицы;
σ – одноосное напряжение;
E – модуль упругости (модуль Юнга).

Модуль упругости (модуль Юнга) является величиной, характеризующей жесткость материала. Модуль упругости связывает упругую деформацию и нормальное напряжение линейным соотношением.

Существует прямая зависимость модуля упругости от вида и энергии химических связей, действующих между атомами и молекулами данного материала. Материалы с высокой энергией межатомных связей характеризуются большим модулем упругости: для стали модуль упругости равен $E \approx 206$ ГПа, для кварцевого стекла $E \approx 75$ ГПа, для полистирола 3,2 ГПа.

Для большинства строительных материалов закон Гука справедлив только до определенного напряжения (предела упругости). При нагрузках, соответствующим большим напряжениям (примерно $0{,}2\sigma$), материал деформируется необратимо, проявляет свойство пластичности. **Пластичность** – свойство материала необратимо деформироваться, изменяя форму и размеры, под воздействием внешних сил. Пластическая деформация, не исчезающая после снятия нагрузки, называется необратимой или остаточной.

Необратимую деформацию имеют такие материалы, как пластмассы, некоторые композиты, большинство металлов. Пластичные материалы, как правило, однородные по строению и состоят из крупных, способных смещаться относительно друг друга молекул (органические вещества) или кристаллов с легко деформируемой кристаллической решеткой.

Пластичные материалы проявляют большее сопротивление отрыву частиц, чем их сдвигу относительно друг друга, и разрушаются, главным образом, от сдвига частиц в плоскостях действия наибольших касательных напряжений. Именно вследствие сдвига частиц увеличивается длина образца из пластичного материала при его растяжении.

Хрупкость – свойство материалов под действием нагрузки разрушаться без значительной пластической деформации.

Образцы из хрупких материалов при испытании на сжатие, разрушаются внезапно, раскалываясь по наклонным плоскостям, примерно под углом 45°.

К хрупким материалам относятся природные и искусственные каменные материалы, стекло, чугун и др.

Деление материалов на хрупкие и пластичные является условным, так как свойства материалов зависят от температуры, скорости и вида нагрузки. Один и тот же материал в одних условиях ведет себя как хрупкий, в других- как пластичный. Например, мрамор при одноосном растяжении разрушается как хрупкий материалов, а при всестороннем сжатии проявляет пластические свойства.

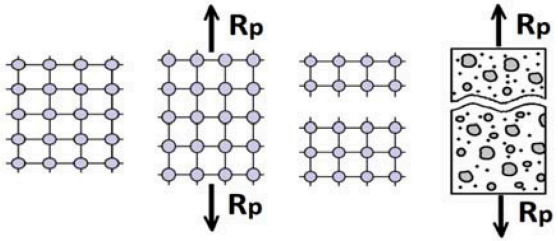


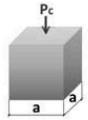
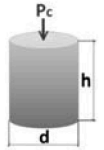
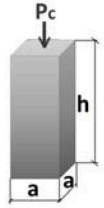
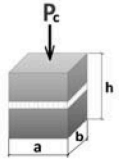
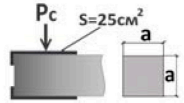
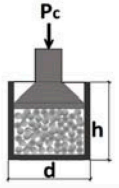
Рис. 1.22. Схема упругой деформации и хрупкого разрушения под воздействием упругих растягивающих напряжений: а – ненапряженная структурная решетка; б – упругая деформация структуры под действием растягивающей нагрузки; в, г – хрупкое разрушение в результате разрыва молекулярных связей структурной решетки и материала

При достижении некоторой предельной величины нагрузки строительный материал разрушается.

Разрушение материала происходит в результате нарушения целостности его структуры, как реакции на силовую нагрузку, и сопровождается разрывом связей между молекулами (рис. 1.22).

Таблица 1.10

Стандартные образцы для испытаний строительных материалов на сжатие

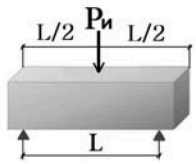
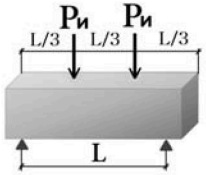
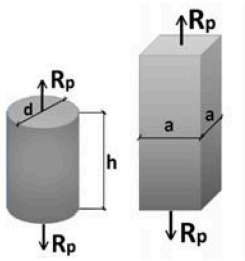
Материал	Форма образца	Размеры образца, мм	Эскиз образца
Бетон (ГОСТ 10180)	Куб	Длина ребра: 70; 100; 150; 200; 250; 300	
Бетон (ГОСТ 10180)	Цилиндр	Диаметр d: 70; 100; 150; 200; 250; 300 h ≥ d	
Асфальтобетон (ГОСТ 12801)		Диаметр d: 50,5; 71,4; 101	
Горные породы (ГОСТ 21153.2)	Призма квадратного сечения	От 30 до 80 Отношение высоты к его диаметру от 0,7 до 2	
Древесина вдоль волокон (ГОСТ 16483.10) Древесина поперек волокон (ГОСТ 16483.11)		20×20×300	
Кирпич керамический (ГОСТ 8462)	2 целых кирпича или составной из двух его половинок	В зависимости от размера кирпича	
Кирпич силикатный (ГОСТ 8462)			
Портландцемент (ГОСТ 30744)	Половинка образца-призмы	160×40×40	
Строительный раствор (ГОСТ Р 57338)			
Щебень и гравий для строительных работ (ГОСТ 8269.0)	Проба щебня, гравия в цилиндре	d = 150; h = 150 d = 75; h = 75	

Прочностные свойства

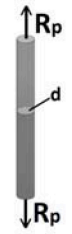
Прочность – свойство материала сопротивляться внутренним напряжениям, вызванным воздействием внешних сил или других факторов, не разрушаясь.

Таблица 1.11

Стандартные образцы и схемы для испытаний строительных материалов на растяжение при изгибе и осевое растяжение

Материал	Форма образца	Размеры образца, мм	Эскиз
Прочность на растяжение при изгибе			
Бетон (ГОСТ 10180)	Призма квадратного сечения	100×100×400; 150×150×600; 200×200×800; 250×250×1000; 300×300×1200	
Портландцемент (ГОСТ 30744) Строительный раствор (ГОСТ Р 57338)		160×40×40	
Древесина (ГОСТ 16483.3)		20×20×300	
Кирпич керамический (ГОСТ 8462)	Целый кирпич	250×120×65; 250×85×65; 250×120×88; 250×60×65; 288×138×65; 288×138×88; 250×120×55; 250×200×70	
Кирпич силикатный (ГОСТ 8462)		250×120×65; 250×120×88; 250×85×65; 250×60×65; 250×120×138	
Прочность на осевое растяжение			
Бетон (ГОСТ 10180)	Призма квадратного сечения	100×100×400; 150×150×600; 200×200×800; 250×250×1000; 300x300x1200	
	Цилиндр	Диаметр d: 100; 150; 200; 250; 300 Высота h, равная 2d	

Продолжение таблицы 1.11

Материал	Форма образца	Размеры образца, мм	Эскиз
Сталь арматурная (ГОСТ 12004)	Стержень	Диаметр от 3 до 80 мм	

Характеризуется прочность максимальным напряжением, вызывающем разрушение материала под действием статической нагрузки. В зависимости от вида действующей нагрузки различают прочность на сжатие, растяжение при изгибе, осевое растяжение, срез, кручение и т.д.

Внутренние напряжения в материале появляются не только в случае приложения нагрузки, но и при усадке, нагревании и замерзании воды в порах материала.

Напряжение – физическая величина, численно равная силе, приходящейся на единицу площади сечения материала.

Прочность строительных материалов определяют с помощью гидравлического пресса, на образцах в виде куба, призмы, цилиндра, стержня (табл. 1.10, 1.11). Единица прочности в системе СИ – паскаль (1 Па = 1 Н/м^2). Для строительных материалов прочность измеряют в мегапаскалях (МПа) или кгс/см^2 (1 МПа = 0,1 кгс/см^2).

Так как строительные материалы неоднородны и содержат дефекты структуры (поры, трещины и др.), то прочность определяется, как средний результат испытания серии образцов.

Прочность одного и того же материала может иметь различную величину в зависимости от размера образца, его формы, скорости приложения нагрузки, поэтому для получения сравнимых результатов испытания строительного материала проводят по стандартным методикам, установленным государственным стандартом для каждого вида материала.

Основной характеристикой для хрупких материалов, к которым относятся природные и искусственные каменные материалы, керамический и силикатный кирпич, является прочность на сжатие.

Прочность на сжатие определяется по формуле:

$$R_c = P_c / S, \qquad (1.26)$$

где R_c – прочность на сжатие, МПа;

P_c – разрушающая нагрузка, Н;

S – первоначальная площадь сечения образца, $м^2$.

Строительные материалы в зависимости от прочности подразделяются на марки и классы.

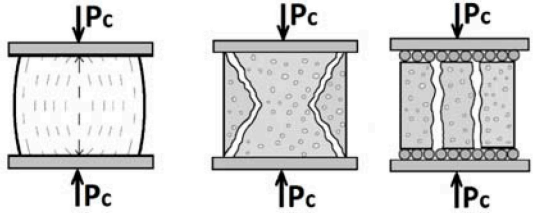
Образцы кубической формы имеют большую прочность по сравнению с образцами в виде призмы одинакового поперечного сечения.

У образцов-кубов маленьких размеров прочность будет выше, чем у образцов-кубов больших размеров из того же материала. Поэтому для строительных материалов устанавливают базовые размеры образцов. Значения полученной прочности для образцов, не соответствующих по размеру базовому, умножают на масштабный коэффициент.

На результаты испытаний влияют не только форма и размеры образцов, но и состояние опорных поверхностей гидравлического пресса. Силы трения затрудняют перемещение частиц металла в этих участках и влияют не только на результаты испытаний, но и на характер разрушения. При наличии трения наблюдается разрушение по форме конусов

При возрастании сил трения наблюдается увеличение значения прочности. При этом интенсивность ее влияния на получаемое значение показателя с увеличением высоты образца снижается. Это объясняется формированием неоднородного состояния его приконтактных зон и выражается в образовании «конусов трения».

Силы трения между опорными гранями образца-куба и плитой пресса, удерживают частицы образца, прилегающие к плитам, от поперечного расширения (рис. 1.23, а), в то время как средняя часть образца свободно расширяется. Поэтому при разрушении образцов-кубов из хрупких материалов образуются две усеченные пирамидки (рис. 1.23, б). При уменьшении сил трения между плитой пресса и гранями образца, например, при нанесении на плиты парафина, он будет свободно деформироваться в поперечном направлении и распадется на отдельные вертикальные слои (рис. 1.23, в).



а) б) в)

Рис. 1.23. Схема разрушения хрупких материалов при сжатии:
а – поперечное расширение образца; б – образец установлен на плиту пресса без слоя парафина; в – образец контактирует с плитой пресса через слой парафина

Бетон, природные каменные материалы, керамический и силикатный кирпич хорошо сопротивляются воздействию сжимающих нагрузок и хуже – растяжению, изгибу и удару, поэтому их используют для конструкций и конструктивных элементов, работающих на сжатие.

Природные каменные материалы, применяемые в качестве заполнителей в бетонах, испытывают не на отдельных образцах правильной геометрической формы, а в смеси.

Дробимость щебня (гравия) при сжатии в цилиндре – косвенный показатель прочности щебня или гравия, по которому устанавливают их марку.

Для испытания в цилиндр диаметром 150 и 75 мм (в зависимости от размера фракции) засыпают пробу щебня или гравия, сверху вставляют плунжер, размещают на нижнюю плиту пресса и подают нагрузку, доводят ее до заданного значения и снимают. Раздробленный материал выгружают из цилиндра и просеивают через стандартное сито.

Дробимость определяют по формуле:

$$Др = [(m - m_1)100] / m, \quad (1.27)$$

где Др – дробимость материала, %;

m – навеска щебня, кг;

m_1 – масса остатка на контрольном сите после просеивания раздробленной в цилиндре пробы щебня (гравия), кг.

Прочность на растяжение при изгибе определяется на образцах-балочках, установленных на двух опорах. Нагружение образцов производят одной или двумя сосредоточенными силами до разрушения. Прочность на растяжение при изгибе образца-балочки рассчитывается по формулам:

- с одной сосредоточенной силой:

$$R_и = 1{,}5P_и \cdot l / (b \cdot h^2), \quad (1.28)$$

где $R_и$ – прочность на растяжение при изгибе, МПа;

$P_и$ – разрушающая нагрузка при изгибе, кгс;

l – расстояние между опорами, м;

b – ширина поперечного сечения образца, м;

h – высота поперечного сечения образца, м.

- с двумя сосредоточенными силами:

$$R_и = 3P_и \cdot (l - a) / (b \cdot h^2), \quad (1.29)$$

где a – расстояние между силами, м.

Прочность на растяжение при изгибе является основной прочностной характеристикой для древесины, арматурной стали, гипсокартона, плиток керамических для отделки внутренних и наружных стен и полов.

Прочность на осевое растяжение можно вычислить по формуле:

$$R_p = P_c / S, \quad (1.30)$$

где R_p – прочность на осевое растяжение, МПа;
P_c – разрушающая нагрузка, Н;
S – первоначальная площадь сечения образца, $м^2$.

Прочность при осевом растяжении R_p используется в качестве основной характеристики для таких конструкционных материалов, как сталь, древесина и кровельные покрытия (рубероид, рубемаст, гибкая черепица).

Ударная прочность (ударная вязкость) – свойство материала противостоять разрушению при ударных воздействиях.

Ударная прочность определяется для материалов, которые в процессе эксплуатации в конструкциях подвергаются динамическим нагрузкам (полы промышленных зданий, дорожные покрытия). Испытания проводятся на образцах-цилиндрах диаметром и высотой 20-30 мм на копре Педжа.

Ударная прочность характеризуется работой, расходуемой на разрушение стандартного образца, отнесенной к единице объема (Дж/$м^3$) или площади материала (Дж/$м^2$). Хрупкие материалы плохо сопротивляются ударным нагрузкам (природные каменные материалы, бетоны, растворы, керамические изделия). Хрупкий тип разрушения опасен для металлов, особенно при низких температурах.

Ударную прочность важно знать для материалов, используемых при устройстве фундаментов для оборудования, полов промышленных предприятий, дорожных и аэродромных покрытий и т.д.

Динамическая прочность является важным критерием оценки материалов, эксплуатирующихся при нагрузках, изменяющихся во времени. Особенно важна данная характеристика для конструкций защитных сооружений, мостов, взлетно-посадочных полос, свайных опор и т.п.

Снижение массы здания при строительстве позволяет не только уменьшить нагрузки на фундамент и несущие конструкции, но и экономить строительные материалы, такие, как бетон, раствор и арматурная сталь (уменьшении процента армирования конструкций). Это возможно при использовании строительных материалов с высокими значениями коэффициента конструктивного качества.

Коэффициент конструктивного качества (удельная прочность) – характеристика материала, равная отношению прочности к относительной плотности. Определяется коэффициент конструктивного качества (ккк) по формуле:

$$ккк = R / d, \quad (1.31)$$

где R – прочность материала, МПа;
d – относительная плотность материала (безразмерная величина), равная

$p_c / p_в = p_c / 1000$.

Повышение коэффициента конструктивного качества можно добиться снижением средней плотности материала и увеличением его прочности.

Наиболее эффективными являются материалы с высокой прочностью и минимальной плотностью. По коэффициенту конструктивного качества пластмассы занимают первое место среди других строительных материалов, поэтому из них можно создавать прочные и в то же время самые легкие конструкции.

Истираемость материала характеризуется потерей массы и изменением высоты образца под действием истирающих усилий.

Определяют истираемость материала по массе и изменению высоты образца:

- по массе:

$$G = (m_1 - m_2) / S, \quad (1.32)$$

где G – истираемость строительного материала, г/$м^2$;
m_1 – масса образца до испытания, кг;
m_2 – масса образца после испытания, кг;
S – площадь истираемой грани образца, $м^2$;

- по изменению высоты образца:

$$A = l_o - l, \quad (1.33)$$

где A – уменьшение высоты образца, м;
l_o – размер образца до испытаний, м;
l – размер образца после испытаний, м.

Испытания проводят на образцах-кубах с ребром 70 мм на круге истирания типов ЛКИ-2, ЛКИ-3 или Беме. По потере массы при истираемости, например, бетоны подразделяют на 3 марки от G1 до G3, а по изменению высоты – на 7 марок от А1,5 до А-22.

Таблица 1.12

Марки истираемости по изменению массы бетона

Величина истираемости по изменению массы, г/$см^2$, не более	0,7	0,8	0,9
Марки истираемости по изменению массы G	G1	G2	G3

Низкую истираемость имеют бетоны с маркой по истираемости G1; среднюю – G2 и низкую – G3 (табл. 1.12).

Истираемость имеет большое значение при выборе материалов для полов, лестничных маршей и площадок, тротуаров, покрытий дорог и аэродромов.

Истираемость (износ) каменных материалов (щебня, гравия) определяют по потере массы зерен при испытании пробы в полочном барабане с внутренним диаметром 700 мм и длиной 500 мм с металлическими шарами диаметром 48 мм (рис. 1.24).

Истираемость щебня (гравия) вычисляется в процентах по формуле

$$И = [(m – m_1) / m]\cdot 100, \quad (1.34)$$

где И – истираемость (износ) щебня, %;

m – масса пробы материала, кг;

m_1 – масса остатков на контрольных ситах, кг.

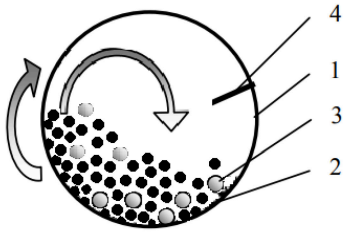


Рис. 1.24. Схема определения истираемости (износа):
1 – полочный барабан, вращающийся со скоростью 30-33 об/мин;
2 – проба зернистого материала; 3 – металлические шары;
4 – полка для подъема щебня (гравия)

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

Определение твердости материалов выполняется различными методами: Бринелля, Роквелла, Виккерса и др.

Твердость металла, древесины, пластмасс определяется путем вдавливания в поверхность строительного материала под нагрузкой наконечников, имеющих сферическую, коническую или другую форму.

Чаще всего твердость строительных материалов определяют по методу Бринелля (рис. 1.25) путем вдавливания под определенной нагрузкой в предварительно отшлифованную поверхность испытуемого образца стального шарика диаметром 5 или 10 мм на приборе ТШМ (твердомер шариковый).

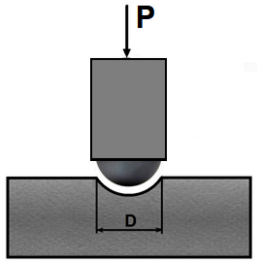


Рис.1.25. Схемы определения твердости строительных материалов по Бринеллю

По диаметру отпечатка, полученного на образце, рассчитывают твердость (показатель твердости) материала:

$$HB = P / F, \quad (1.35)$$

где HB – твердость материала, Н/мм^2;

P – фиксированная нагрузка, Н;

F – площадь поверхности отпечатка образца материала, мм^2.

Для горных пород твердость можно ориентировочно определить с помощью шкалы, разработанной немецким минералогом и геологом Фридрихом Моосом. Шкала Мооса состоит из 10 минералов (в порядке возрастания твердости), из которых каждый последующий царапает все предыдущие.

Твердость измеряется в условных единицах, соответствующих номеру минерала: тальк – 1, гипс – 2, кальцит – 3, флюорит – 4, апатит – 5, ортоклаз – 6, кварц – 7, топаз – 8, корунд – 9, алмаз – 10.

Химические и физико-химические свойства

Для правильной и полной оценки материалов при их изготовлении, выборе и эксплуатации в конструкциях необходимо знать и учитывать не только их физические и механические, но и химические, а также физико-химические свойства.

Химические свойства определяют степень активности материала к химическому взаимодействию с реагентами внешней среды и способность сохранять постоянными состав и структуру материала в условиях окружающей среды.

Некоторые материалы склонны к самопроизвольным внутренним химическим изменениям в обычной среде. Ряд материалов проявляет активность при взаимодействии с кислотами, водой, щелочами, растворами,

агрессивными газами и т. д. Химические изменения протекают также при технологических процессах производства и применения материалов.

Растворимость – свойство вещества образовывать растворы при взаимодействии с водой. Строительные материалы должны быть нерастворимы в условиях окружающей среды на вес период их эксплуатации.

Диффузия – процесс взаимного проникновения молекул или атомов одного вещества между молекулами или атомами другого вещества, приводящий под влиянием теплового движения к самопроизвольному выравниванию их концентраций во всем объеме системы.

Диффузия характеризуется коэффициента диффузии, который зависит от концентрации дисперсной фазы, свойств дисперсионной среды и размеров диффундирующих частиц:

$$D = R \cdot T / (6\pi \cdot N_A \cdot \eta \cdot r) = k_Б \cdot T / (6\pi \cdot \eta \cdot r), \qquad (1.36)$$

где D – коэффициент диффузии;

η – вязкость дисперсионной среды;

r – радиус диффундирующих частиц;

N_A – число Авогадро;

$k_Б$ – постоянная Больцмана ($k_Б = R / N_A$).

Сорбция – это процесс поглощения жидкостью или твердым телом различных веществ из окружающей их среды. Разновидностями сорбции являются адсорбция, абсорбция и хемосорбция.

Адсорбция – процесс поглощения вещества из жидкой или газовой среды поверхностным слоем материала. Поглощение веществ протекает на границе раздела фаз: твердое тело – жидкость, твердое тело – газ (пар), жидкость – жидкость, жидкость – газ (пар).

Например, молекулы ПАВ на поверхности частицы цемента самопроизвольно ориентируются таким образом, что неполярный радикал R обращен в сторону частицы, а полярная гидрофильная группа (–OH), интенсивно взаимодействующая с водой, остается в водной фазе.

Такая ориентация обеспечивает снижение свободной поверхностной энергии твердой частицы поверхностного натяжения σ. С увеличением общей концентрации раствора величина адсорбции растет, молекулы в адсорбционном слое сближаются и образуют плотноупакованный (насыщенный) монослой. Величина поверхностного натяжения при этом снижается до минимального значения, а адсорбция достигает предельной величины.

Адсорбция протекает не на всей поверхности материала, а только на ее активных центрах (дефектах кристаллической решетки).

Количественно величину адсорбции компонента характеризуют числом молей этого компонента, находящихся в поверхностном слое адсорбционной системы, отнесенным либо к единице площади поверхности адсорбента (S), либо к единице его массы.

Прямыми методами определения удельной поверхности твердых тел

являются газовая адсорбция (метод БЭТ) и газовая хроматография (метод термической десорбции).

Адсорбенты, как правило, имеют большую удельную поверхность – до нескольких сотен квадратных метров на грамм.

Адсорбция играет положительную роль при введении в бетонные и растворные смеси пластифицирующих и активных минеральных добавок.

Абсорбция – поглощение какого-либо вещества из окружающей среды всей массой поглощающего тела (адсорбента), то есть объемное поглощение жидкостью или твердым телом. Явление адсорбции используется во многих производствах строительных материалов и при очистке газов.

Хемосорбция – поглощение вещества поверхностью какого-либо материала с образованием химической связи между молекулами вещества и сорбента.

Карбонизация – процесс поглощения материалом углекислого газа из воздуха с образованием новых химических соединений.

Коррозионная стойкость – свойство материала противостоять химическому и физическому воздействию агрессивных сред, не разрушаясь.

Стойкость к воздействию агрессивных сред на материалы, используемых при строительстве, зависит от их состава, свойств, а также вида агрессивной среды.

Агрессивная среда – это природная или технологическая среда любого агрегатного состояния, способная вступать в химическое взаимодействие с окружающими ее материалами или конструкциями, приводя их в состояние, при котором они не могут в дальнейшем выполнять свое функциональное назначение.

В зависимости от физического состояния агрессивные среды подразделяются на газовые (диоксид углерода, аммиак, диоксид серы, фторид водорода, хлор и др.), жидкие (растворы кислот, щелочей, солей, морская вода и др.) и твердые (соли, оксиды, гидроксиды, органические соединения, аэрозоли и пыли).

По интенсивности воздействия агрессивные среды могут быть неагрессивные, слабоагрессивные, среднеагрессивные и сильноагрессивные.

По характеру воздействия на бетонные и железобетонные конструкции внешние агрессивные среды классифицируются на химические (сульфатная, магнезиальная, кислотная, щелочная и т.п.); биологически активные (химическое воздействие продуктов метаболизма грибов, бактерий); физико-механическое воздействие (корней растений, гифов грибов, обрастание водорослями, лишайниками и т.п.); воздействие отрицательных температур (переменное замораживание и оттаивание).

Наиболее опасны для строительных конструкций кислые среды. Для бетонов коррозионная стойкость в растворах кислот определяется путем измерения скорости химического взаимодействия кислоты с бетоном при постоянном погружении образцов бетона в раствор кислоты заданной концентрации. Действие агрессивных сред приводит к накоплению

кристаллических продуктов в порах материала, вызывающему рост деформаций и разрушение изделия. В бетонах скорость диффузии зависит от характеристик пористой структуры, в том числе от заряда поверхности.

Глубина коррозионного поражения бетона Гр в проектные сроки службы бетона t рассчитывается по формуле:

$$Гр = a + K\sqrt{t}\,, \qquad (1.37)$$

где a – постоянная величина, учитывающая влияние процессов, протекающих в диффузионно-кинетической области в начальный период испытаний; определяют по графику $\sqrt{t} - \sqrt{Гр}$ по пересечению прямой с осью ординат.

Высокой стойкостью по отношению к агрессивным средам (щелочам и кислотам) обладают керамические материалы с плотной структурой, пластмассы и композитные материалы.

Карбонатные материалы (доломиты, известняки, мраморы) нестойки к действию кислых сред, а битумы – к действию щелочной среды.

Атмосферостойкость – способность материала сохранять структуру и свойства под влиянием климатических факторов (температуры воздуха, атмосферных осадков, солнечной радиации, микроорганизмов и др.).

Для асфальтобетонов, эмульсионно-минеральных и других типов дорожных покрытий за счет старения органических вяжущих входящих в их состав, уменьшается пластичность и увеличивается хрупкость материалов, что приводит к интенсивному трещинообразованию и сокращению срока эксплуатации автомобильных дорог.

Биологическая стойкость – свойство материала противостоять воздействию микроорганизмов. Низкую биологическую стойкость имеют преимущественно материалы органического происхождения (битумы, древесина и др.).

Важной физико-химической характеристикой взаимодействия жидкости с поверхностью твердых тел является смачивание.

Смачивание – это поверхностное явление, заключающееся во взаимодействии жидкости с поверхностью твёрдого тела или другой жидкости. Смачивание бывает двух видов.

Смачивание зависит от соотношения между силами сцепления молекул жидкости с молекулами (или атомами) смачиваемого тела (адгезия) и силами взаимного сцепления молекул жидкости (когезия).

Различные жидкости неодинаково смачивают одну и ту же поверхность. Лучше смачивает поверхность та жидкость, которая ближе по полярности к смачиваемому материалу (веществу).

Величиной, характеризующей смачивание материала, является краевой (контактный) угол смачивания θ, который определяется законом Юнга:

$$\cos\theta = (\sigma_{тг} - \sigma_{тж}) / \sigma_{жг}, \qquad (1.38)$$

где cosθ – угол смачивания;

$\sigma_{тг}$, $\sigma_{тж}$, $\sigma_{жг}$ – удельные свободные поверхностные энергии на границах раздела жидкость / газ; твердое, тело / жидкость; твердое тело / газ.

Если жидкость образует на твердой поверхности краевой угол менее 90°, то такую поверхность называют гидрофильной, если более 90°, то поверхность называют гидрофобной (рис. 1.26, а).

В зависимости от значения краевого угла смачивания различают несмачивание (гидрофобность) при θ > 90° или cosθ < 0) и ограниченное смачивание (гидрофильность) при θ < 90° или cosθ > 0).

Гидрофильность и гидрофобность можно оценить по растеканию капли воды на гладкой поверхности материала (рис. 1.27).

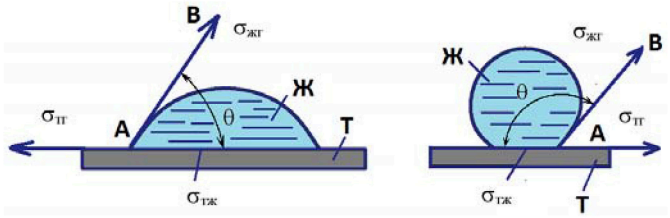


Рис. 1.26. Краевой угол смачивания на гидрофильной (а) и гидрофобной (б) поверхности материала

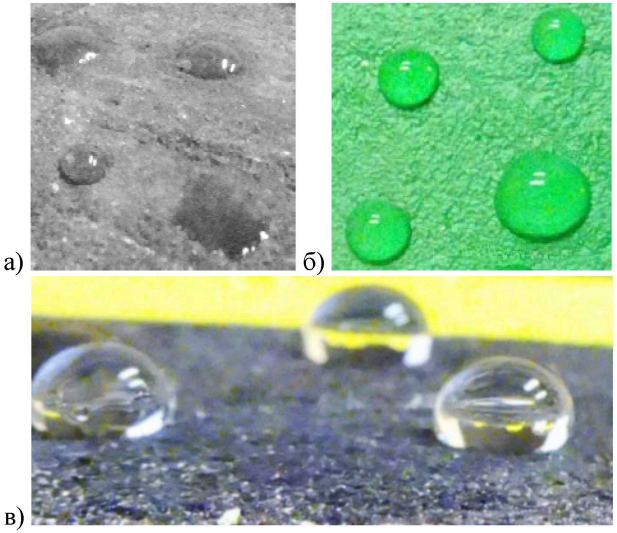


Рис.1.27. Гидрофильная (а) и гидрофобные (б, в) поверхности

Гидрофильность – свойство материала смачиваться водой. Молекулы жидкости притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам материала. В результате жидкость распределяется по поверхности, расплывается по ней. Так ведёт себя вода на чистом стекле или древесине. В этом случае жидкость смачивает поверхность.

Гидрофобность – свойство материала не смачиваться водой. Молекулы жидкости притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам материала. В результате силы притяжения между молекулами жидкости собирают её в каплю. Так ведёт себя вода на парафине или «жирной» поверхности, ртуть на стекле. В этом случае жидкость не смачивает поверхность.

Большинство строительных материалов являются гидрофильными и открытые поры легко заполняются водой.

Значения краевого угла смачивания для твердых поверхностей разных материалов значительно отличаются: фторопласт – 102-108, сталь – 41-90, полипропилен – 53, полиэтилен – 33, стекло кварцевое – 0-7, органическое стекло – 0,7, кварц – 0.

Гидрофобностью обладают строительные материалы, содержащие органические соединения с преобладанием углеводородных групп в молекуле (например, битум, фторполимеры, лаки, краски).

Для снижения водопоглощения, водопроницаемости и морозостойкости гидрофильных строительных материалов их поверхность обрабатывают гидрофобизирующими веществами, с ассиметричным строением молекул, таких как полигидросилоксаны, алюмометилсиликонат натрия, стеарат цинка, этилсиликонат натрия и др.). Осаждаясь в виде мельчайших капелек на поверхности материала, стенках мелких пор и капилляров, они образуют гидрофобные покрытия/пленки, с водоотталкивающими свойствами.

Гидрофобизация способствует повышению водонепроницаемости, водо- и морозостойкости, сохранению декоративных характеристик строительных материалов.

Шероховатость увеличивает площадь поверхности «твердое тело – газ» и «твердое тело – жидкость» и не влияет на площадь поверхности «жидкость – газ».

При шероховатости поверхности площадь реальной поверхности больше идеальной (гладкой) поверхности и характеризуется коэффициентом шероховатости:

$$K_ш = S_ш / S_{ид}, \quad (1.39)$$

где $K_ш$ – коэффициент шероховатости;

$S_ш$ – площадь поверхности с учетом шероховатости, м^2;

$S_{ид}$ – площадь идеальной (гладкой) поверхности, м^2.

Зависимость смачиваемости от шероховатости поверхности можно определить из уравнения Венцеля – Дерягина:

$$\cos\theta_ш = K\cos\theta. \quad (1.40)$$

Из уравнения следует, что для смачивающих жидкостей ($\cos\theta > 0$) шероховатость приводит к уменьшению краевого угла ($\cos\theta_ш > \cos\theta$). При $K\cos\theta = 1$ смачивание перейдет в растекание.

В случае несмачивания поверхности шероховатость приводит к увеличению краевых углов: $\cos\theta_ш < \cos\theta$, ($\theta_ш > \theta$).

Адгезия – совокупность сил, связывающих одну поверхность с другой.

Когезия – это связь между молекулами внутри материала.

Адгезия может иметь механическую, химическую или электромагнитную природу и измеряется силой отрыва на единицу площади.

В некоторых случаях адгезия может оказаться сильнее, чем когезия внутри однородного материала. В этом случае при приложении разрывающего усилия происходит когезионный разрыв, то есть разрыв в объёме менее прочного из соприкасающихся материалов.

Адгезия обусловлена межмолекулярным взаимодействием (вандерваальсовым, полярным, иногда – образованием химических связей или взаимной диффузией) в поверхностном слое и характеризуется удельной работой, необходимой для разделения поверхностей.

Работа, которая совершается системой из двух поверхностей при их равновесной взаимной адгезии, отнесенная к единице площади контакта, называется работой адгезии A_a.

Работу адгезии можно представить как:

$$A_a = E_{св}N, \quad (1.41)$$

где $E_{св}$ – средняя энергия единицы связи, определяющая адгезию Дж;

N – число таких связей на единицу площади.

Полная работа адгезии, приходящаяся на всю площадь контакта поверхностей, равна:

$$A_s = A_aS, \quad (1.42)$$

где A_s – полная работа адгезии, Дж;

A_a – работа адгезии, отнесенная к единице площади, Дж/м^2;

S – площадь контакта поверхности, м^2.

Адгезия обеспечивает сцепление цементного камня или битума к зернам заполнителя, песка, щебня, гравия и образование монолита.

Для получения, например, асфальтобетона с большой адгезионной прочностью битума к поверхности минерального заполнителя, необходимо создать такие условия, при которых обеспечивается максимальное содержание битума в структурированном состоянии, а содержание свободного битума было бы сведено к минимуму (рис. 1.28).

Адгезию, например, сухих строительных смесей определяют по силе отрыва образца затвердевшего раствора от основания - бетонной плиты, приложенной к образцу через металлический диск с анкером, приклеенный к поверхности образца.

Адгезия, одна из основных характеристик отделочных и окрасочных материалов, характеризует сцепление лакокрасочного покрытия с окрашенной поверхностью.

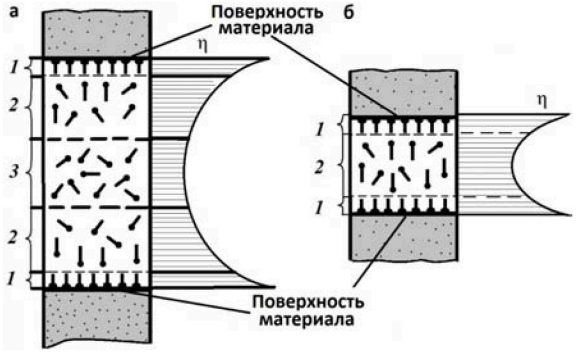


Рис. 1.28. Схема взаимодействия минерального материала и битума:
а – контакт между минеральными частицами через слой свободного битума;
б – то же через слой с упорядоченным расположением молекул;
1– зона с ориентированным расположением молекул; 2 – зона с упорядоченным расположением молекул; 3 – зона свободного битума

Дисперсность – физическая величина, характеризующая размер частиц в раздробленном материале. Дисперсность – величина, обратная поперечному размеру частицы:

$$D = 1 / a, \qquad (1.43)$$

где D – дисперсность, $м^{-1}$;
a – поперечный размер частицы (диаметр для сферических частиц, длина ребра для кубических частиц), м.

Чем меньше размер частиц, тем больше дисперсность. Полидисперсность определяется функцией распределения частиц по размерам или массам (рис. 1.29).

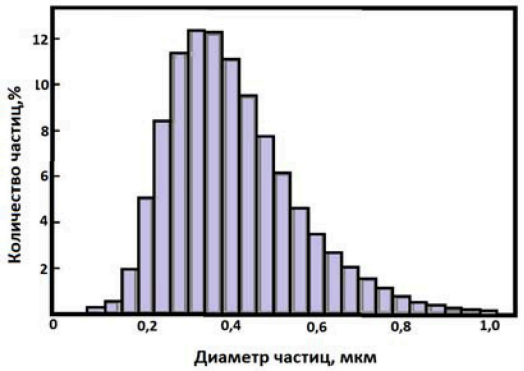


Рис. 1.29. Гистограмма распределения частиц сыпучего материала по размерам

Некоторые строительные материалы (гипсовые вяжущие, цемент, глина, пигменты и т.п.) находятся в дисперсном состоянии и обладают большой суммарной поверхностью частиц.

Показателем степени раздробленности материала и развитости его поверхности является удельная поверхность $S_{уд}$, которая характеризуется как поверхность единицы объема ($см^2/см^3$) или массы ($см^2/г$) материала.

Удельная поверхность – это суммарная поверхность всех частиц материала, приходящаяся на единицу объема или массы дисперсной фазы.

Удельная поверхность пропорциональна дисперсности или обратно пропорциональна размеру частиц дисперсной фазы и характеризует дисперсность порошкообразных материалов: минеральных вяжущих веществ, наполнителей, пигментов и др.

Определяют удельную поверхность материала методами сорбции газов, органических веществ и т.д. Наибольшее распространение получил метод низкотемпературной сорбции азота (метод БЭТ).

Удельная поверхность тонкоизмельченных материалов достигает больших значений: портландцемента 250-400 $м^2/кг$, строительного гипса 300–500 $м^2/кг$.

Седиментация – осаждение частиц, размеры которых превышают $1 \cdot 10^{-7}$ м, под действием силы тяжести.

Скорость седиментации, при которой происходит полное осаждение частиц с некоторой высоты, равна:

$$U = H / t, \qquad (1.44)$$

где U – скорость седиментации частиц, м/с;
H – высота, с которой происходит осаждение частиц, м;
t – время полного осаждения частиц, с.

При оседании частиц сила вязкого сопротивления среды равна силе тяжести. Для сферических частиц:

$$6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot U = 4/3\pi \cdot r^3 \cdot (\rho - \rho_0) \cdot g, \quad (1.45)$$

где $4/3\pi \cdot r^3$ – объем частицы дисперсной фазы, $м^3$;

$(\rho - \rho_0)$ – разность между плотностью частицы дисперсной фазы и плотностью дисперсионной среды, $кг/м^3$;

g – ускорение свободного падения, $м/с^2$;

U – скорость седиментации частицы, м/с;

η – вязкость дисперсионной среды, $Нс/м^2$;

r – радиус частицы дисперсной фазы, м.

Тогда скорость седиментации будет равна:

$$U = [2r^2 \cdot (\rho - \rho_0) \cdot g] / 9\eta. \quad (1.46)$$

Из уравнения следует, что с увеличением радиуса частицы дисперсной фазы и уменьшением вязкости среды скорость седиментации будет увеличиваться. Если $(\rho - \rho_0) > 0$, то происходит оседание, при $(\rho - \rho_0) < 0$ – всплывание частиц – обратная седиментация. Например, суспензия битума или парафина в воде.

Уравнение (1.46) используется для определения размеров грубодисперсных частиц и имеет огромное практическое значение, т.к. дисперсность определяет производственные показатели многих искусственных (цемент, гипс) и природных материалов. Размер частиц можно вычислить из уравнения:

$$r = \sqrt{[9\eta \cdot U) / (2(\rho - \rho_0) \cdot g]}. \quad (1.47)$$

Уравнение (1.47) применимо для сферических частиц с размерами от 10^{-7} до 10^{-4} м при условии их независимого движения друг от друга.

Тиксотропия – способность пластично-вязких смесей обратимо восстанавливать свою структуру, разрушенную механическими воздействиями. Физическая основа тиксотропии – разрушение структурных связей внутри пластично-вязкого материала, при этом материал теряет структурную прочность и превращается в вязкую жидкость, а после прекращения механического воздействия материал снова обретает структурную прочность.

Тиксотропия проявляется в разжижении при достаточно интенсивном встряхивании или перемешивании гелей, паст, суспензий и других систем с коагуляционной дисперсной структурой и их загущении (отвердевании) после прекращения механического воздействия. Тиксотропное восстановление структуры – механически обратимый изотермический процесс, который может быть воспроизведён многократно.

Явление тиксотропии проявляется при виброуплотнении и укладке бетонных и растворных смесей, нанесении мастичных и окрасочных составов и т.д.

Технологические свойства

Свойства, выражающие способность материала к восприятию определенных технологических операций с целью изменения формы, размеров, характера поверхности, плотности, называют **технологическими**.

Технологические свойства характеризуют поведение материала при технологических процессах обработки и переработки (дробимость горных пород, формуемость, слеживаемость, нерасслаиваемость бетонных смесей, твердение и др.) и зависят от природы сырья и его физико-технических показателей.

Знание технологических свойств необходимо для выбора оборудования, режимов и технологии производства строительных материалов. По технологическим свойствам судят о возможности переработки и получения качественной продукции из исходного сырья при принятой технологии и имеющемся технологическом оборудовании.

Формуемость – свойство смесей, состоящих из различных компонентов, приобретать заданную форму.

Нерасслаиваемость – свойство смесей сохранять однородность при изготовлении, транспортировании и хранении. Это свойство важно для бетонных (растворных) смесей, битумных эмульсий, лаков, красок и модифицирующих добавок.

Дробимость – свойство природных и искусственных каменных материалов при ударе делиться на отдельные составляющие различных размеров и формы. Если при дроблении выход щебня кубовидной и тетраэдрной форм составляет не менее 75 %, дробимость каменных материалов считается хорошей.

Степень измельчения характеризует отношение среднего диаметра частиц до измельчения (D) к диаметру частиц после измельчения (d). Степень измельчения (n) можно определить по формуле $n = D / d$.

Уплотняемость – свойство смеси приобретать заданную плотность при наименьших энергетических затратах.

Полируемость – свойство горной породы приобретать зеркальную поверхность.

Укрывистостью называют способность красочного состава закрывать цвет окрашиваемой поверхности непросвечивающим слоем.

Слеживаемость – свойство частиц порошка или материала уплотняться в большие конгломераты или в сплошной массив.

Тиксотропия – свойство пластично-вязких смесей обратимо восстанавливать свою структуру, после разрушения механическим воздействием. Тиксотропия характерна для материалов, имеющих коллоидную структуру, бетонов, растворных смесей и др.

Удобоукладываемость смеси – это характеристика, определяющая ее способность к распределению, уплотнению и формованию соответствующими средствами механизации для получения проектной конструкции.

1.7 Стандартизация и оценка качества строительных материалов

Деятельность по разработке, опубликованию и применению стандартов, по установлению норм, правил и характеристик в целях обеспечения безопасности продукции, работ и услуг называется **стандартизацией**.

Целями стандартизации являются:

- повышение уровня безопасности жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц;
- обеспечение конкурентоспособности и качества продукции (работ, услуг), единства измерений, рационального использования ресурсов;
- содействие соблюдению требований технических регламентов;
- создание систем классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации;
- деятельность по установлению правил и характеристик в целях их добровольного многократного использования;

К документам по стандартизации относятся:

- документы национальной системы стандартизации;
- общероссийские классификаторы;
- стандарты организаций, в том числе технические условия;
- своды правил и др.

В этих нормативных документах содержатся термины и определения, краткая характеристика материалов и способы их изготовления, требования к качеству, методы испытаний, а также правила транспортирования, приемки и хранения и др.

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

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.

Единая система конструкторской документации – комплекс межгосударственных стандартов, устанавливающих взаимосвязанные правила, требования и нормы по разработке, оформлению и обращению конструкторской документации

Единая система технологической документации направлена на улучшение качества выпускаемых изделий, на сокращение сроков, повышение эффективности и снижение трудоемкости работ, связанных с подготовкой и управлением производством, что является важнейшим конкурентным преимуществом.

Конструкторская документация (КД) – графические и текстовые документы, которые, в совокупности или в отдельности, определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки, изготовления, контроля, эксплуатации, ремонта и утилизации.

Основополагающим документом градостроительного права, как основы правового регулирования градостроительной деятельности на территории Российской Федерации является градостроительный кодекс.

Градостроительный кодекс Российской Федерации (**ГрК РФ**) – кодифицированный нормативный правовой акт, регулирующий градостроительные и отдельные связанные с ними отношения на территории Российской Федерации.

Основные требования к качеству материалов и изделий массового применения устанавливаются Техническими регламентами (ТР), Государственными стандартами (ГОСТ), отраслевыми стандартами (ОСТ), техническими условиями (ТУ), сводами правил (СП) и др.

Технический регламент – регламент, содержащий технические требования либо непосредственно, либо путем ссылки на стандарт или технические условия, либо путем включения в себя содержания этих документов.

Технические требования к материалам и изделиям изложены в **Государственных стандартах**, в которых приводятся определение материала и цифровые показатели свойств, которым должен удовлетворять материал. В них приводятся методы испытания, условия хранения и транспортирования материалов.

Отраслевой стандарт – документ, устанавливающий нормы, правила, требования, параметры, термины, понятия и обозначения на виды продукции, необходимые для обеспечения качества продукции в конкретной отрасли.

Технические условиями, используются разработчиками и производителями строительных материалов, конструкций и прочих изделий промышленных предприятий.

Указания о применении строительных материалов и требования к их свойствам приведены также в сводах правил (СП), где регламентируются основные положения по проектированию и строительству.

Свод правил – нормативный документ, рекомендующий технические решения или процедуры инженерных изысканий для строительства, проектирования, строительно-монтажных работ и изготовления строительных изделий, а также эксплуатации строительной продукции и определяющий способы достижения ее соответствия обязательным требованиям строительных норм, правил и стандартов.

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.

Модуль (основной модуль) – это исходная линейная условная единица

измерения, применяемая для взаимосогласованности и координации размеров зданий и сооружений, их элементов, строительных конструкций, изделий и элементов оборудования.

Основной модуль принят за основу для назначения других, производных от него модулей. Международное стандартизированное обозначение основного модуля – «М». Значение основного модуля для координации размеров принимают равным 100 мм.

Размеры объемно-планированных параметров зданий и сооружений (ширину пролетов, шаг колоны, рам) и крупных строительных изделий (стеновых панелей, блоков, плит) назначают кратными укрупненным модулям 60М; 30М; 15М; 12М; 6М; 3М, равных 6000; 3000; 1500; 1200; 600; 300 мм соответственно.

Там, где невозможно применить основной модуль, при назначении размеров, меньших чем основной модуль может быть использован дробный модуль (субмодуль): 1/2М; 1/4М; 1/5М, равные 50, 25, 20 мм соответственно.

Качество строительных материалов закладывается на стадии разработки, обеспечивается в процессе производства и поддерживается на стадии эксплуатации.

Главными при оценке качества того или иного материала считаются количественные показатели его свойств.

Качество формируется на всех этапах производства материала и определяется целым рядом факторов, основные из которых: свойства сырья и полуфабрикатов, особенности технологического процесса и оборудования, квалификация работников, уровень организации производства.

В свою очередь, от качества материалов в значительной степени зависит эффективность продукции строительного назначения.

Система управления качеством, применяемая в строительстве, основана на показателях серии ISO 9000. От качественных характеристик строительной продукции зависит спрос, объемы продаж и финансовые результаты деятельности организации.

Качество материалов характеризует степень их соответствия требованиям потребителя.

Качество материалов характеризуется показателями строительно-технических свойств, например, прочности, долговечности, надежности, технологичности, экономичности и др.

Для количественной оценки свойств строительных материалов используют статистические методы, основанные на теории вероятности и математической статистики.

К статистическим характеристикам относятся: среднее арифметическое, дисперсия, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации.

Среднее арифметическое определяется как число, равное сумме всех значение полученной величины, делённой на их количество:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i = \frac{1}{n}(x_1 + \ldots + x_n), \qquad (1.48)$$

где x_i – значение полученной величины;

n – количество измерений.

Другой статистической характеристикой является дисперсия S, которая характеризует степень разброса отдельных результатов измерений x_i относительно среднего значения:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}. \qquad (1.49)$$

Корень квадратный из дисперсии называют средним квадратичным отклонением:

$$S_0 = \sqrt{\frac{n}{n-1}S^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}. \qquad (1.50)$$

Изменчивость измерений оценивается безразмерной величиной – коэффициентом вариации:

$$\nu = S_0 / \bar{x}. \qquad (1.51)$$

где S_0 – среднее квадратическое отклонение;

$\bar{x}$ – среднее арифметическое.

Для определения показателей качества используются разнообразные методы:

- 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.

Контрольные вопросы

1. Перечислите виды структур строительных материалов.
2. Что такое жизненный цикл строительного материала?
3. Назовите основные свойства строительных материалов.
4. Какие свойства относятся к параметрам структуры строительного материала?
5. Как меняются свойства строительных материалов в зависимости от пористости? Приведите примеры.
6. Перечислите свойства строительных материалов по отношению к действию воды.
7. Что характеризует коэффициент размягчения?
8. Что такое морозостойкость? Какие параметры структуры влияют на морозостойкость материала?
9. Что такое теплопроводность? Какие факторы оказывают влияние на теплопроводность материала?
10. Какие свойства относятся к механическим?
11. Как влияет пористость на прочность строительных материалов?
12. Что такое истираемость?
13. Чем отличаются гидрофильные от гидрофобных материалов?
14. Назовите технологические свойства строительных материалов.
15. Перечислите основные нормативные документы, определяющие качество материалов и изделий.

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Строительные материалы, получаемые из горных пород, широко используются в строительстве. Они относительно доступны и обладают высокими физико-механическими показателями такими как прочность, морозостойкость, долговечность и другие.

В строительстве применяют каменные материалы из горных пород, изготавливают изделия и производят вяжущие вещества. За счет переработки горных пород, их последующей тепловой обработки, сушки или обжига получают изделия и полуфабрикаты, которые применяют для возведения стен, облицовки внутренних помещений и отделки фасадов зданий, а также в дорожном строительстве (в виде брусчатки и др.).

Из горных пород наиболее широкое применение нашли следующие: кремнеземистые, которые содержат кремнезем SiO_2 (кварцевый песок, песчаник и др.); глиноземистые, состоящие в основном из глинозема Al_2O_3 (глины, бокситы и прочие); карбонатные, содержащие углекислый кальций $CaCO_3$ – известняки, мел и др.; сульфаты – гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) и ангидриты ($CaSO_4$). Большой интерес представляют глины, они состоят из глинисты частиц размером менее 0,01-0,001 мм.

Широкое применение при производстве вяжущих веществ получили карбонатные и сульфатные породы, а также глина, мел, мергели и известняки.

Более твердые горные породы используются для получения различного вида заполнителей, которые применяют при изготовлении изделий и конструкций из бетонов.

2.1 Общие сведения о горных породах

Горной породой называют минеральную массу более или менее постоянного состава, состоящую из одного – мономинерального или нескольких – полиминеральных минералов. Примером мономинеральных горных пород являются кварцевые пески, химически чистые гипс, магнезит, а полиминеральных – гранит, базальт, порфиры.

Минералом называют природное тело, однородное по химическому составу и физическим свойствам. Минерал является продуктом физико-химических процессов, совершающихся в земной коре.

Благодаря повсеместной распространенности в природе и разнообразным физико-механическим свойствам природные каменные материалы широко применяют в строительстве для разнообразных целей. Их используют без обработки (в качестве заполнителей) или подвергают механической обработке (дроблению, распиловке, отёске, шлифовке), получая щебень, плиты, штучные камни, различные архитектурно-декоративные детали. Горные породы являются также основным сырьем для получения минеральных вяжущих веществ – гипса, извести, цемента и в производстве искусственных каменных

материалов – кирпича, стекла, изделий из бетонов и растворов.

В зависимости от условий происхождения горные породы подразделяются на **три генетические группы** (табл. 2.1):

- **магматические породы**, образовавшиеся в процессе кристаллизации сложного природного силикатного расплава – магмы (граниты, сиениты, диориты, габбро, порфиры, диабазы, базальты, трахиты, андезиты, порфириты, вулканическая пемза, вулканический пепел, вулканические туфы);

- **осадочные породы**, возникшие в поверхностной части земной коры в результате переотложения продуктов выветривания и разрушения различных горных пород, химического и механического выпадения осадка из воды, жизнедеятельности организмов или всех трёх процессов одновременно (гипс, ангидрит, магнезит, доломиты, известковые туфы, известняки, мел, ракушечник, диатомит, трепел, песчаники, конгломераты, брекчии);

- **метаморфические горные породы** – породы, образовавшиеся в толще земной коры в результате изменения осадочных и магматических горных пород под действием высокой температуры, большого давления и различных газовых и водных растворов (гнейсы, глинистые сланцы, мраморы, кварциты).

Среди большого разнообразия природных минералов лишь небольшая их часть принимает участие в образовании горных пород. Такие минералы называют **породообразующими**, а минералы, которые входят в состав горных пород редко и в небольшом количестве называют **редкими**.

Таблица 2.1

Классификация горных пород по происхождению

Магматические породы		Осадочные породы			Метаморфические породы	
массивные	обломочные	химические осадки	органогенные отложения	механические отложения (обломочные породы)	породы, образовавшиеся в результате изменения осадочных пород	породы, образовавшиеся в результате изменения магматических пород

2.2 Структура и текстура горных пород

Структура горных пород – характеристика особенностей строения горных пород, обусловленных степенью их кристалличности, абсолютным и относительным размером, формой слагающих их зёрен минералов и взаимоотношением между составными компонентами. Отражает способы и условия образования породы и всех последующих вторичных изменений, является важнейшим диагностическим и классификационным признаком

наряду с минеральным и химическим составами и текстурой горных пород.

Детальное изучение структуры горных пород возможно только под микроскопом.

Основные типы структур различаются с точки зрения визуального определения составных частей и их взаимоотношения, по форме зерен, по абсолютному размеру зерен, по относительному размеру зерен.

1 С точки зрения визуального определения составных частей и их взаимоотношения:

1.1 Явнозернистые (размер зерен больше 0,1 мм):

1.1.1 Кристаллические:

- полнокристаллические;
- неполнокристаллические.

1.1.2 Обломочные.

1.1.3 Органогенные.

1.2 Скрытозернистые (размер зерен меньше 0,1 мм):

1.2.1 Микрокристаллические.

1.2.2 Стекловатые.

2 По форме зерен:

2.1 Магматические породы: панидиоморфные; гипидиоморфные; диабазовые; габбровые.

2.2 Метаморфические породы: кристаллобластовые (гранобластовые и лепидобластовые); катакластические.

2.3 Обломочные породы: окатанные; неокатанные.

3 По абсолютному размеру зерен (для всех, кроме стекловатых).

Для всех, кроме обломочных: гигантозернистые (более 20 мм); крупнозернистые (5-20 мм); среднезернистые (1-5 мм); мелкозернистые (0,1-1 мм); скрытозернистые (менее 0,1 мм).

Для обломочных: псефитовые (более 1 мм); псаммитовые (0,1-1 мм); алевритовые (0,01-0,1 мм); пелитовые (менее 0,01 мм).

4 По относительному размеру зерен: равномернозернистые; неравномернозернистые (порфировидные; порфировые; порфиробластовые).

5 Основные типы текстур различают по расположению составных частей в пространстве, по степени заполнения составными частями объема породы.

5.1 По расположению составных частей в пространстве:

- однородная (изотропная);
- неоднородная (анизотропная):

а) линейные (линейнопараллельные);

б) плоские (плоскопараллельные);

в) полосчатые (слоистые);

г) линзовидные;

д) сложно-неоднородные (микроскладчатые, сетчатые, сложно-пятнистые, сложно-полосчатые и пр.).

5.2 По степени заполнения составными частями объема породы: плотные (компактные); пористые – пузыристые, шлаковые, пемзовые, кавернозные;

миндалекаменные; друзитовые.

Текстура обломочной породы, если она хорошо выражена, может служить признаком, указывающим на условия образования породы. Так, для обломочных пород, формирующихся в водной среде, характерны различные типы слоистых текстур (или просто слоистости): горизонтальная, волнистая, косая и др. Помимо слоистости к текстурам относят также знаки ряби, трещины усыхания, различные отпечатки на поверхности пластов осадочных пород.

Отдельность горных пород – способность пород раскалываться на характерные формы блоков. Обусловлена она, как правило, условиями формирования пород.

Специфические формы отдельности – шаровая, подушечная, матрацевидная, линзовидная и др.

Сланцеватость – предельно густая система отдельности, при которой порода может разделяться по трещинам вплоть до отдельных минеральных зерен за счет наличия чешуйчатых, таблитчатых и вытянутых минералов.

Кливаж – система параллельных поверхностей скольжения, секущая структурные и текстурные неоднородности пород, обусловленная обычно механическим воздействием в условиях сжатия и часто маскирующая истинную слоистость.

2.3 Породообразующие минералы

Основными породообразующими минералами являются: кварц и его разновидности, полевые шпаты, железисто-магнезиальные силикаты, слюды, карбонаты и сульфаты.

Кварц (рис. 2.1), состоящий из диоксида кремния (SiO_2) в кристаллической форме – один из самых распространенных, прочных и стойких минералов. Он обладает исключительно высокой прочностью при сжатии (до 2000 МПа), высокой для хрупких материалов прочностью при растяжении (около 100 МПа), а также высокой твердостью (7 по шкале Мооса), уступающей только твердости топаза, корунда и алмаза. Средняя плотность кварца составляет 2650 кг/м^3.

Кварц отличается высокой кислотостойкостью и вообще химической стойкостью при обычной температуре: из кислот на него действует фтористоводородная кислота и горячая фосфорная; едкие щелочи вступают в химическое взаимодействие с кварцем при повышенной температуре.

Кварц плавится при температуре около 1700 °С, поэтому широко используется в огнеупорных материалах.

Благодаря высокой прочности и химической стойкости кварц остается почти неизменным при выветривании магматических пород, в состав которых он входит (например, при выветривании гранитов). Поэтому он является также одним из самых распространенных минералов и в осадочных породах (в песчаниках и кварцевых песках). Цвет кварца может быть различным, но чаще всего встречаются бесцветный, молочно-белый и серый.



Рис. 2.1. Разновидности кварца: а – горный хрусталь (водяно-прозрачный кристалл); б – аметист; в – раухтопаз; г – морион

Прозрачные, полупрозрачные и красиво окрашенные разновидности носят названия: горный хрусталь (водяно-прозрачный кристалл), аметист (фиолетовый), раухтопаз (дымчатый топаз), морион (черный).

Полевые шпаты – самые распространенные минералы магматических пород (до 2/3 общей массы породы) (рис. 2.2). Как и кварц, они представляют собой светлые составные части пород (белые, розоватые, красные и т.п.). Главными разновидностями полевых шпатов являются ортоклаз и плагиоклазы.

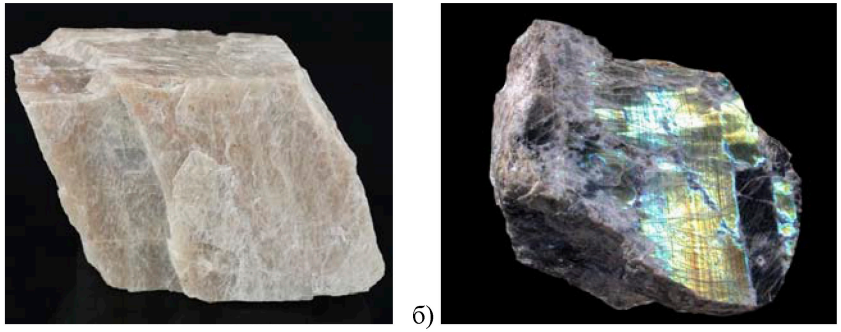


Рис. 2.2. Разновидности полевого шпата: а – ортоклаз; б – плагиоклаз

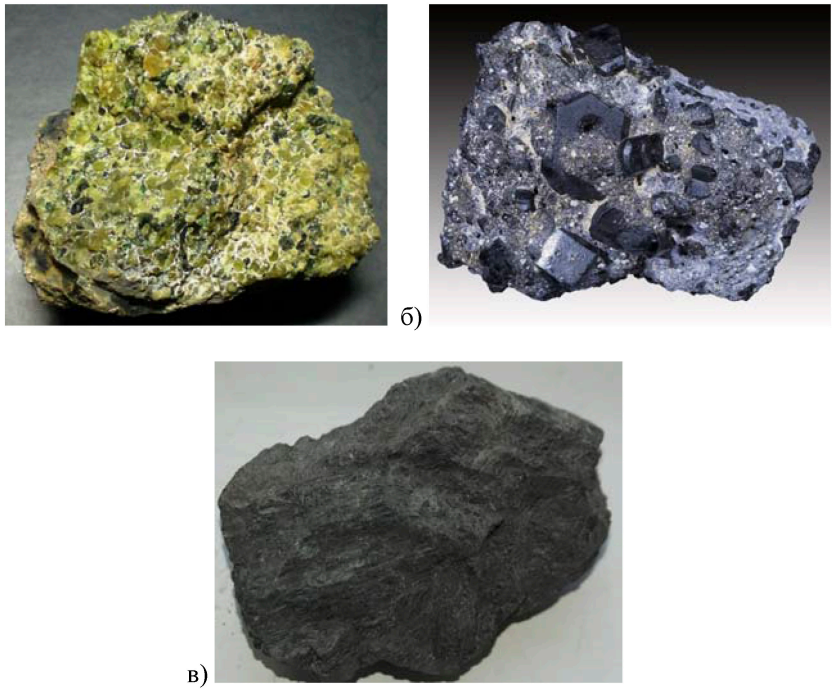
Ортоклаз ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ или $K[AlSi_3O_8]_2$) характеризуется следующими свойствами: угол между спайностями 90°, твердость 6-6,5,

плотность 2570 кг/м^3, плавится при температуре 1170 °С, полное расплавление – при 1450 °С. Встречается в кислых (гранитах) и средних (сиенитах) по кислотности магматических породах.

Плагиоклазы образуют изоморфный ряд от альбита ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ или $Na[AlSi_3O_8]_2$), входящего в состав кислых пород, до анорита ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ или $Ca[AlSi_3O_8]$), характерного для основных пород (габбро, базальта и др.).

По сравнению с кварцем полевые шпаты обладают значительно меньшей прочностью (120-170 МПа на сжатие) и стойкостью, поэтому они реже встречаются в осадочных породах (главным образом, в виде полевошпатовых песков). Выветривание полевых шпатов происходит под влиянием воды, содержащей углекислоту. Результатом выветривания является новый минерал – каолинит (важнейшая часть самой распространенной осадочной породы – глины).

К цветным (темноокрашенным) минералам, встречающимся в магматических породах, относятся **железомагнезиальные и магнезиальные силикаты** (рис. 2.3).



а) б) в)

Рис. 2.3. Железомагнезиальные силикаты: а – оливин; б – авгит; в – роговая обманка

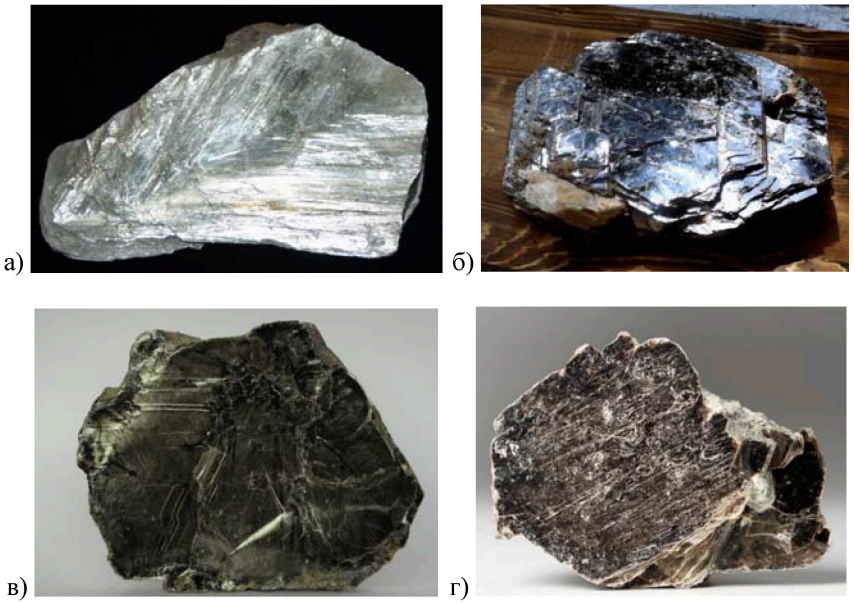
В группе железомагнезиальных силикатов наиболее распространены оливин, пироксены (например, авгит), амфиболы (роговая обманка). Среди магнезиальных силикатов встречаются вторичные минералы, чаще всего замещающие оливин – серпентин, хризотил-асбест.

Железомагнезиальные силикаты – минералы темного цвета (от темно-зеленого до черного); для них характерны твердость 5-7, высокая плотность (3000-4000 кг/м^3) и прочность на сжатие (300-400 МПа), а также повышенная вязкость при ударах. Эти минералы передают свой темный цвет и высокие механические свойства основным породам габбро, диабазу, в которых они содержатся в значительном количестве.

Слюды, встречающиеся в гранитах и некоторых других магматических породах, относятся к группе алюмосиликатов (рис. 2.4).

Мусковит – почти бесцветная калиевая слюда, полупрозрачна, тугоплавка и химически стойка.

Биотит – магнезиально-железистая слюда черного цвета выветривается легче, чем мусковит. Твердость слюд 2-3, для них характерна совершенная спайность в одном направлении. Биотит входит в состав многих магматических горных пород. Выветривается он быстрее, чем мусковит. Мусковит встречается в изверженных и осадочных горных породах. Встречаются другие разновидности слюд – **флогопит**, **гидрослюды**.



а) б) в) г)

Рис. 2.4. Слюды: а – мусковит; б – биотит; в – флогопит, г – гидрослюда

Алюмосиликаты (слюды) понижают прочность пород, ускоряют их выветривание и затрудняют шлифование и полирование, так как в результате совершенной спайности слюды весьма легко разделяются на очень тонкие пластинки. Слюды встречаются и в песках, где также считаются вредной примесью: бетоны и строительные растворы на песке с значительным содержанием слюды обладают пониженной морозостойкостью.

Для специальных отделочных штукатурок в растворы иногда намеренно вводят слюду в целях достижения определенного художественного эффекта.

Важнейшими породообразующими минералами осадочных горных пород являются кальцит, магнезит, доломит, гипс и ангидрит.

Кальцит ($CaCO_3$) – бесцветный или белый, при наличии механических примесей серый, желтый, розовый или голубоватый минерал (рис. 2.5).

Блеск стеклянный. Плотность 2700 кг/м^3, твердость 3. Характерным диагностическим признаком является растворимость с бурным вскипанием в 10 %-ной соляной кислоте. Имеется разновидность карбоната кальция, называемая арагонитом. В условиях земной поверхности арагонит неустойчив и переходит в кальцит.



Рис. 2.5. Кальцит

Магнезит ($MgCO_3$) – бесцветный, белый, серый, желтый, коричневый минерал. Плотность 3000 кг/м^3, твердость 3,5-4,5. Растворяется в соляной кислоте при нагревании. Применение магнезита основано на высокой огнеупорности и вяжущих свойствах оксида магния. Магнезит, обожженный при 1500-1650 °С, представляет собой высокоогнеупорный материал, применяющийся для изготовления магнезитового кирпича, а обожженный при 750-800 °С дает каустический магнезит и образует с раствором хлорида или сульфата магния магнезиальное вяжущее.

Доломит ($CaMg(CO_3)_2$) – бесцветный или белый, часто с желтоватым или буроватым оттенком минерал (рис. 2.6). Блеск стеклянный. Плотность 2800 кг/м^3, твердость 3-4. В 10 %-ной соляной кислоте вскипает только в порошке и при нагревании. Доломит обычно мелкозернист, крупные кристаллы встречаются редко. Образуется он либо как первичный химический осадок,

либо в результате доломитизации известняков. Минерал доломит слагает породу того же названия. Применяется в качестве сырья для производства магнезиальных и доломитовых вяжущих веществ, доломитовых огнеупорных материалов, а также в качестве строительного камня, щебня для бетона.

Гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) представляет собой скопление белых и бесцветных кристаллов, иногда окрашенных механическими примесями в голубые, желтые или красные тона. Блеск стеклянный.

Плотность 2300 кг/м^3, твердость 2. Для гипса, развивающегося в пустотах и трещинах, характерно волокнистое строение и шелковистый блеск. Иногда гипс встречается в виде тонкозернистых и землистых агрегатов, а также слагает цемент песчаника. Гипс применяется в производстве гипсовых вяжущих веществ, портландцемента и др.

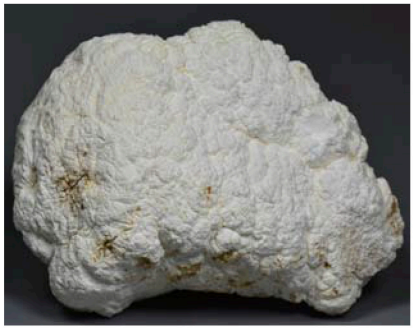
а)  б) 

Рис. 2.6. Карбонаты: а – доломит; б – магнезит

Ангидрит ($CaSO_4$) – белый, серый, светло-розовый, светло-голубой минерал. Блеск стеклянный. Плотность 3000 кг/м^3, твердость 3-3,5. Как правило, встречается в виде сплошных мелкозернистых агрегатов; крупные кристаллы образуются редко, они обычно имеют таблитчатую, игольчатую или призматическую формы.

Красиво окрашенные ангидрит и гипс иногда применяют как облицовочный материал для внутренних отделок зданий, а после пропитки водостойкими эмульсиями и для наружных отделок. Ангидрит используют для производства вяжущих веществ. Гипс и ангидрит слагают породы того же названия.

Наиболее характерной особенностью строения осадочных пород является их слоистость. В том случае, когда слоистость отсутствует, текстуру называют беспорядочной, так как частицы располагаются в ней без всякой ориентировки.

Каолинит ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ или $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$) – белый, иногда с буроватым или зеленоватым оттенком минерал. Плотность его 2600 кг/м^3, твердость 1, на ощупь жирный. Встречается в виде мелоподобных плотных агрегатов.

Каолинит образуется в результате разложения полевых шпатов, слюд и

некоторых других силикатов в процессе их выветривания и переноса продуктов разрушения. На земной поверхности устойчив в условиях кислой среды. Он слагает каолиновые глины, входит в состав полиминеральных глин, иногда присутствует в цементе обломочных пород.

2.4 Магматические горные породы

Граниты обладают благоприятным для строительного камня минеральным составом, отличающимся высоким содержанием кварца (25-30 %), натриево-калиевых шпатов (35-40 %) и плагиоклаза (20-25 %), обычно небольшим количеством слюды (5-10 %) и отсутствием сульфидов.

Граниты имеют высокую механическую прочность на сжатие – 120-250 МПа (иногда до 300 МПа). Сопротивление растяжению, как у всех каменных материалов, относительно невысокое и составляет около 1/30- 1/40 сопротивления сжатию.

Важнейшее свойство гранитов – их малая пористость (не превышающая 1,5 %), что обусловливает водопоглощение около 0,5 % (по объему). Поэтому морозостойкость их высокая. Огнестойкость гранитов недостаточна, так как они растрескиваются при температуре выше 600 °С вследствие полиморфных превращений кварца. Граниты, как и большинство других плотных магматических пород, обладают высоким сопротивлением истиранию.

Граниты весьма разнообразны по цвету, зависящему в основном от окраски полевых шпатов: они могут быть белыми, серыми, желтыми, розовыми, красными. Различные сочетания отдельных компонентов и изменение структуры обусловливают разнообразие цветов, оттенков и рисунка гранитов, поэтому они являются прекрасным облицовочным материалом. Высокая прочность на сжатие и морозостойкость гранитов позволяют применять их для защитной облицовки набережных, устоев мостов, цоколей зданий, а также в качестве щебня для высокопрочных и морозостойких бетонов. Кроме этого, благодаря значительной кислотостойкости гранитов их используют в качестве кислотоупорной облицовки.

Граниты как наиболее распространенные из глубинных магматических пород широко используют в строительстве. Остальные глубинные породы (сиениты, диориты, габбро и т.п.) как менее распространенные в природе применяются в строительстве значительно реже.

Сиениты – горные породы составляют около 2,6 % магматических пород. Цвет этих пород зависит от цвета полевых шпатов и поэтому они окрашены в розовые, серые и зеленоватые тона. Сиениты состоят из калиевых (50-70 %) и натриевых полевых шпатов (10-30 %), цветных минералов (10-20 %). Если присутствует кварц (10-15 %), то породу называют кварцевым сиенитом. По физико-механическим свойствам сиениты близки к гранитам, несколько уступая им по прочности из-за отсутствия кварца.

Диориты и кварцевые диориты – породы серого цвета; состоят они из плагиоклаза (65-70 %) и роговой обманки, иногда с пироксенами или биотитом,

составляющими около 25-30 %. Структура породы равномернозернистая, средне- или мелкозернистая. Текстура массивная или пятнистая, что обусловлено наличием обособлений, обогащенных темноцветными минералами. Кварцевые диориты характеризуются присутствием 5-20 % кварца и меньшим содержанием роговой обманки. Структура и текстура аналогичны диоритам. Плотность диоритов 2900 кг/м^3, предел прочности при сжатии 150-300 МПа. Наиболее прочны диориты с мелко- и среднезернистой структурой, массивной текстурой и с повышенным содержанием роговой обманки. Разновидности, включающие биотит, имеют пониженную прочность. Диориты и особенно кварцевые диориты превосходят по прочности граниты и сиениты.

Габбро – порода темно-серого или почти черного цвета, что объясняется темной окраской плагиоклазов и высоким содержанием цветных минералов. В результате вторичных изменений плагиоклазы приобретают светло-серый и зеленовато-серый цвет. К группе габбро относится также лабрадорит – горная порода, состоящая в основном из минерала лабрадора (разновидность полевого шпата) серого, зеленовато-серого или темного цвета с синим отблеском на плоскостях спайности. Плотность габбро составляет от 2900 до 3160 кг/м^3, прочность при сжатии от 100 до 280 МПа, а иногда и до 350 МПа. Габбро стоек против выветривания, трудно обрабатывается, но дает хорошую долговечную полировку. Применяют его для гидротехнических и других видов сооружений в виде разнообразных строительных материалов – щебня, облицовочных плит и т.д. Лабрадорит, обладающий красивой расцветкой, используют в качестве облицовочного материала.

Базальт – излившийся аналог габбро, порода темного цвета, очень плотная, скрытокристаллическая или тонкозернистая, иногда порфировая. Базальт состоит из плагиоклаза, авгита (нередко оливина). Плотность базальта от 2900 до 3300 кг/м^3, предел прочности при сжатии 110-500 МПа. Базальт ввиду большой твердости и хрупкости трудно обрабатывается, но хорошо полируется. Применяют в качестве бутового камня и щебня для бетонов. При наличии благоприятной отдельности применяют в дорожном строительстве в виде брусчатки и шашки (для мощения дорог); равномерно-зернистые разновидности используют для облицовок. Базальт является сырьевым материалом для литых каменных изделий и базальтового волокна (рис. 2.7).

Пемза представляет собой пористое вулканическое стекло, образовавшееся в результате выделения газов при быстром застывании кислых и средних лав. Цвет пемзы белый или серый. Пористость ее достигает 80 %; стенки между порами сложены вулканическим стеклом. Твердость 6, истинная плотность – 2000-2500 кг/м^3, средняя плотность 300-900 кг/м^3. Большая пористость пемзы обусловливает хорошие теплоизоляционные свойства, а замкнутость большинства пор – достаточную морозостойкость.

Пемза служит заполнителем в легких бетонах. Наличие в пемзе активного кремнезема позволяет использовать ее в виде гидравлической добавки к цементам и извести. В качестве абразивного материала пемзу применяют для шлифования металлов и дерева, полирования каменных изделий.

Месторождения пемзы встречаются в областях местонахождения действующих и потухших вулканов.

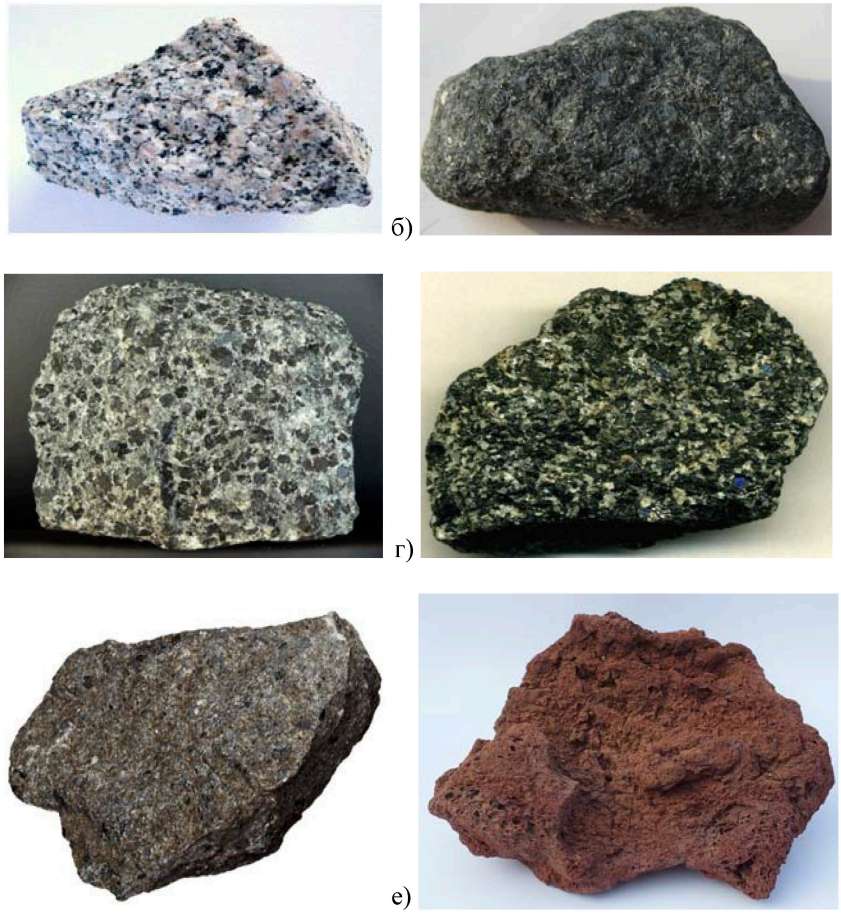


Рис. 2.7. Магматические горные породы:
а – гранит; б – сиенит; в – диорит; г – габбро; д – базальт;
е – вулканический туф

Вулканический пепел – наиболее мелкие частицы лавы, обломки отдельных минералов, выброшенные при извержении вулкана. Размеры частичек пепла колеблются от 0,1 до 2 мм. Вулканический пепел является активной минеральной добавкой для воздушной извести и портландцемента.

Вулканические туфы – горные породы, образовавшиеся из твердых продуктов вулканических извержений: пепла, пемзы и других, впоследствии уплотненных и сцементированных. Цементом туфов является вулканический

пепел, глинистое или кремнистое вещество, иногда с примесью продуктов разложения пепла.

Туфолавы – горная порода, занимающая промежуточное положение между лавой и туфом. Образование туфолав связывают с быстрым вспениванием лав при падении давления и связанным с этим дроблением вкрапленников и стекла без разрыва сплошности лавового потока. В состав вулканических туфов и туфолав входят SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3. Вулканические туфы и туфолавы хорошо сопротивляются выветриванию, мало теплопроводны и, несмотря на большую пористость, морозостойки. Они легко обрабатываются, распиливаются, пробиваются гвоздями, шлифуются, но не полируются.

При истинной плотности около 2600 кг/м^3 плотность породы колеблется от 750 до 1400 кг/м^3. Соответственно пористость ее составляет 70-46 %. Теплопроводность туфа меньше, чем обыкновенного кирпича, что позволяет уменьшать толщину наружных стен зданий. Прочность туфов находится в тех же примерно пределах, что и прочность обыкновенного кирпича, то есть 5-15 (иногда до 30) МПа.

Туф и туфолавы используют в виде пиленого камня для кладки стен жилых зданий, устройства перегородок и огнестойких перекрытий. Используются они также в качестве декоративного камня, чему благоприятствует наличие туфов разных цветов – лиловых, желтых, красных, черных. Применяются туфы и в виде щебня для легких бетонов.

2.5 Осадочные горные породы

Гипс – горная порода, состоящая из минерала того же названия. Гипс применяется для производства воздушного вяжущего – строительного гипса, а также в качестве облицовочного материала для внутренней отделки.

Ангидрит – горная порода, состоящая из одноименного минерала - ангидрита. Применяют в качестве облицовочного минерала, а также в качестве сырья для производства ангидритового цемента.

Магнезит – осадочная горная порода, состоящая из одноименного минерала. Иногда магнезит содержит примеси углекислого кальция и углекислого железа. Применяют данную горную породу в качестве сырья для производства воздушного вяжущего – каустического магнезита и огнеупорных материалов.

Доломит состоит в основном из минерала доломита с примесями глинистого, железистого, кремнистого и других веществ. По свойствам доломиты близки к плотным известнякам. Применяют доломиты для производства щебня, изготовления облицовочных плит, огнеупоров и вяжущих веществ.

Известковые туфы образовались при выделении $CaCO_3$ из кислого углекислого кальция, растворенного в воде. Очень пористые известковые туфы используют как сырье для получения извести, а плотные с мелкими равномерно расположенными порами туфы применяют в виде штучных камней для кладки

стен и в качестве щебня для легких бетонов.

Известняки – осадочные, преимущественно морские образования, состоящие главным образом из кальцита или кальцитовых скелетных остатков организмов, очень редко из арагонита. Могут содержать примеси обломочных частиц минералов. Название известняков обычно дается в зависимости от особенностей слагающих их компонентов, или структуры. Для характеристики компонентов, составляющих менее 50 % всей примесей к названию известняков добавляется соответствующее прилагательное: песчанистый (или песчаный), доломитистый (или доломитовый), кремнистый, глауконитовый и т. п. Плотность известняков составляет от 1700 до 2600 кг/м^3, прочность при сжатии от 10 до 100 МПа. Цвет белый, от желтоватого до бурого. Известняки используют для производства щебня, облицовочных плит и архитектурных деталей, а также для производства извести и портландцемента.

Мел – землистая горная порода, состоящая почти из чистого карбоната кальция. Цвет белый. Применяют в качестве белого пигмента, так как мел обладает высокой дисперсностью, в производстве извести, портландцемента и стекла.

Трепелы и опоки (белые или серые) очень легкие, похожие на каолиновую глину или мел, породы, состоящие из опала, реже халцедона.

Песок – природный неорганический сыпучий материал с крупностью зерен до 5 мм, образовавшийся в результате естественного разрушения скальных горных пород и получаемый при разработке валунно-гравийно-песчаных, гравийно-песчаных и песчаных месторождений. В зависимости от условий образования пески бывают горные, речные, морские, дюнные, барханные и т.д. Применяют в качестве мелкого заполнителя при приготовлении бетонов и растворов.

Гравий – неорганический зернистый сыпучий материал с зернами крупностью свыше 5 мм, получаемый рассевом природных гравийно-песчаных смесей. Применяют в качестве заполнителя для приготовления бетона.

2.6 Метаморфические горные породы

Кристаллические сланцы имеют мелкозернистое слоистое строение, цвет их от темно- до светло-серого. Основная часть породы состоит из зерен кварца, биотита и мусковита. Некоторые разновидности глинистых, кремнистых, слюдистых и иных сланцев являются кровельными сланцами.

Эти сланцы легко раскалываются по плоскостям сланцеватости на тонкие (2-8 мм) плоские плитки. Плотность кровельных сланцев около 2700-2800 кг/м^3; пористость от 0,3 до 3 %; прочность при сжатии от 50 до 240 МПа.

Гнейсы образовались в результате метаморфизма кварцево-полевошпатовых пород. В состав гнейсов входят кварц, биотит, роговая обманка, полевые шпаты. Гнейсы по механическим и физическим свойствам не уступают гранитам, однако, сопротивление на излом параллельно сланцеватости у них в 1,5-2 раза меньше, чем в перпендикулярном

направлении. По плоскостям сланцеватости они раскалываются на плиты, легко расслаиваются при замерзании и оттаивании.

Применяют гнейсы при бутовой кладке, для кладки фундаментов, в качестве материала для щебня и отчасти в виде плит для мощения дорог. Щебень из сильно сланцеватого гнейса не используют для бетона и дорожного строительства из-за непригодности формы зерен.

Кварциты. Их образование связано с перекристаллизацией песчаников. Кварциты содержат 95-99 % SiO_2, их важными свойствами являются высокая огнеупорность (до 1710-1770 °С) и высокая прочность на сжатие (100-455 МПа). В строительстве кварциты используют в качестве подферменных камней в мостах, в виде бута, щебня и брусчатки для мощения дорог, а кварциты с красивой и неизменяющейся окраской идут на облицовку зданий. Кварциты, применяемые в качестве кислотоупорного материала, должны обладать высокой кислотостойкостью. Кварциты используют в производстве динаса – кислого огнеупора, выдерживающего под нагрузкой температуру до 1500-1650 °С.

Мрамор – мелко-, и средне- и крупнозернистая плотная карбонатная порода, состоящая, главным образом, из кальцита и представляющая собой перекристаллизованный известняк. Хотя прочность при сжатии составляет от 100 до 300 МПа, мрамор легко поддается обработке, вследствие малой пористости хорошо полируется. Мрамор широко применяют для внутренней отделки стен зданий, ступеней и лестниц. В виде песка и мелкого щебня (крошки) его используют для цветных штукатурок, при изготовлении облицовочного декоративного бетона. В условиях сульфатной коррозии для наружных облицовок мрамор не применяют.

Контрольные вопросы

1. Расскажите об использовании природных каменных материалов в строительстве.
2. Как классифицируются горные породы?
3. Чем различаются между собой горная порода и минерал?
4. Что вы знаете о магматических породах?
5. Как образовались осадочные породы?
6. Дайте характеристику осадочным породам механического происхождения.
7. Какая органогенная осадочная порода является одной из главных пород, применяемых в строительстве?

ГЛАВА 3. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

Неорганические вяжущие вещества представляют собой порошкообразные материалы, способные при смешивании с водой или растворами солей, кислот, щелочей, органоминеральными жидкостями образовывать пластично-вязкое тесто, которое в результате физико-химических (гидратационных) процессов постепенно твердеет и переходит в камневидное состояние.

В зависимости от условий твердения и сохранения прочности неорганические вяжущие вещества делятся на три группы: воздушные, гидравлические и вяжущие автоклавного твердения (рис 3.1).



Рис. 3.1. Классификация неорганических вяжущих веществ

Воздушные вяжущие вещества твердеют и длительно сохраняют прочность только на воздухе. К ним относятся строительная воздушная известь, гипсовые, ангидритовые и магнезиальные вяжущие, жидкое стекло (силикат натрия $Na_2O{\cdot}nSiO_2$, силикат калия $K_2O{\cdot}nSiO_2$) и др.

Воздушные вяжущие вещества применяются в воздушно-сухих условиях – в надземных сооружениях, не подвергающихся действию воды (влаги), например, внутри помещений.

Гидравлические вяжущие вещества способны твердеть и длительно сохранять (или даже повышать) прочность не только на воздухе, но и в воде (общестроительные и специальные цементы, строительная гидравлическая известь и др.). Гидравлические вяжущие вещества по своему составу являются более сложными веществами, состоящими из нескольких соединений,

содержащих оксиды CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 и др. Они широко используются в надземных, подземных, подводных и гидротехнических сооружениях.

Вяжущие автоклавного твердения, содержащие в своем составе строительную воздушную известь и тонко измельченный кварцевый песок, твердеют (быстро набирают прочность) только в условиях автоклавной обработки (в среде насыщенного водяного пара при давлении 0,8-1,5 МПа, температуре 175-200 °С).

К ним относятся известково-кремнеземистые, известково-зольные, известково-шлаковые вяжущие, нефелиновый цемент и др.

3.1 Гипсовые вяжущие вещества

Гипсовые вяжущие вещества – воздушные вяжущие вещества (твердеющие и сохраняющие прочность только в воздушно-сухих условиях), состоящие из полугидрата сульфата кальция ($CaSO_4{\cdot}0{,}5H_2O$) или безводного сульфата кальция – ангидрита ($CaSO_4$) и получаемые термической обработкой исходного сырья и его помолом.

В качестве исходного сырья используется чаще всего горная порода осадочного происхождения – гипсовый камень ($CaSO_4{\cdot}2H_2O$); реже – ангидритовый камень ($CaSO_4$), а также отходы промышленности (фосфогипс, борогипс и др.).

В зависимости от температуры термической обработки сырья гипсовые вяжущие вещества делятся на низкообжиговые (собственно гипсовые) и высокообжиговые (ангидритовые).

Низкообжиговые гипсовые вяжущие вещества получаются в результате термической обработки природного гипсового камня при низкой температуре (110-180 °С), при этом происходит частичная дегидратация сырья по следующей реакции:

$$CaSO_4{\cdot}2H_2O \rightarrow CaSO_4{\cdot}0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O. \quad (3.1)$$

Низкообжиговые гипсовые вяжущие вещества состоят в основном из полугидрата сульфата кальция ($CaSO_4{\cdot}0{,}5H_2O$) и характеризуются быстрым твердением. К ним относятся строительный гипс, формовочный гипс, высокопрочный (технический) гипс.

Высокообжиговые гипсовые вяжущие вещества получаются в результате термической обработки природного гипсового камня при повышенной температуре (600-1000 °С) по следующим последовательно протекающим реакциям:

$$CaSO_4{\cdot}2H_2O \rightarrow CaSO_4{\cdot}0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O; \quad (3.2)$$
$$CaSO_4{\cdot}0{,}5H_2O \rightarrow CaSO_4 + 0{,}5H_2O. \quad (3.3)$$

Высокообжиговые гипсовые вяжущие вещества состоят в основном из безводного сульфата кальция – ангидрита ($CaSO_4$) и характеризуются медленным твердением. К ним относятся ангидритовое вяжущее, отделочный ангидритовый цемент, высокообжиговый гипс (эстрих-гипс).

Существуют две технологии получения низкообжиговых гипсовых вяжущих веществ:

- обжиг сырья в открытых агрегатах – варочных котлах или печах, когда вода в процессе обжига удаляется в виде пара. По такой технологии получают **строительный гипс**, который состоит в основном из мелких кристаллов β-$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ и обладает высокой водопотребностью. В строительном гипсе может содержаться небольшое количество ангидрита $CaSO_4$ (пережог) и частицы неразложившегося сырья $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (недожог). Прочность при сжатии образцов из строительного гипса достигает 10-12 МПа;

- обжиг сырья в герметически закрытых аппаратах в среде насыщенного пара под давлением. В этом случае вода из гипсовой породы удаляется в капельном состоянии, а получаемый продукт обжига состоит из крупных плотных кристаллов в виде игл или призм. Эта модификация гипса α-$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ называется **высокопрочным гипсом.** Он отличается от β-модификации меньшей водопотребностью, а, следовательно, изделия из такого гипса имеют пониженную пористость и высокую прочность (от 15 до 25 МПа).

Высокообжиговые гипсовые вяжущие вещества (ангидритовые вяжущие) состоят преимущественно из ангидрита $CaSO_4$ и 3-5 % CaO, образующегося при разложении $CaSO_4$ и выполняющего роль активизатора твердения $CaSO_4$.

Ангидритовое вяжущее получается обжигом $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ при температуре 600-1000 °С, либо помолом природного ангидрита $CaSO_4$ с добавками–активизаторами твердения (известью, обожженным доломитом и др.).

Высокообжиговый гипс имеет прочность 10-20 МПа, по сравнению с низкообжиговыми гипсовыми вяжущими медленно схватывается и твердеет, но обладает повышенной водостойкостью.

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

$$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + Q. \qquad (3.4)$$

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

образованием кристаллического сростка из достаточно крупных кристаллов двуводного гипса (рис. 3.2) Твердение гипса сопровождается выделением теплоты – 133 кДж/кг для β-модификации.

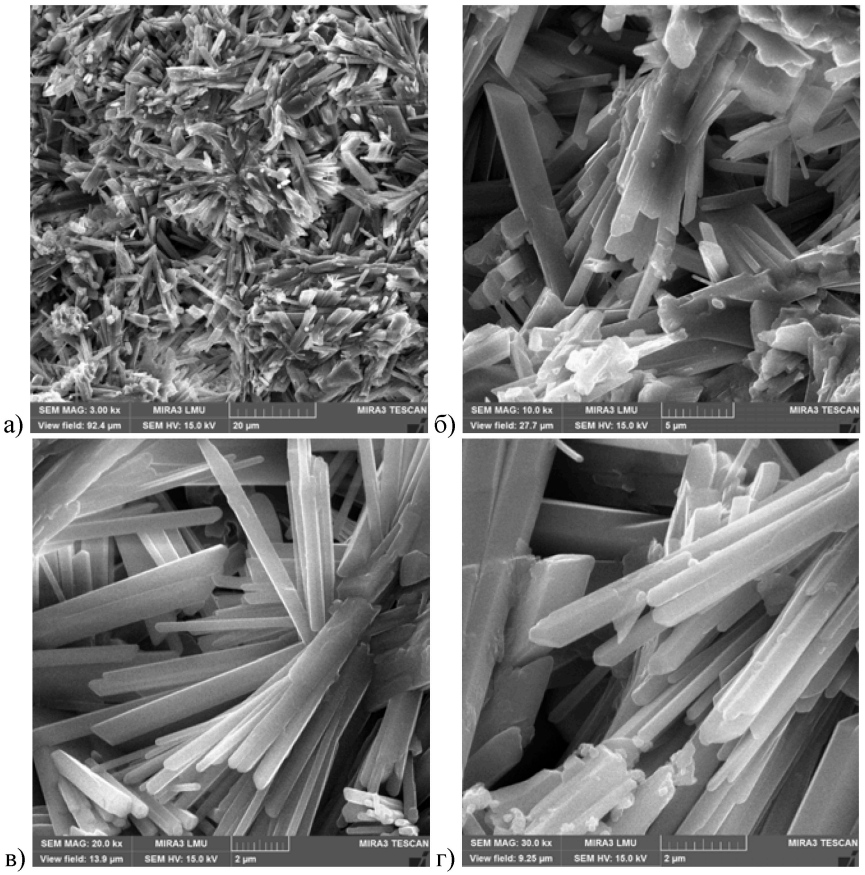


Рис. 3.2. Гипсовый камень при увеличении:
а – в 3000 раз; б – в 10000 раз; в – 20000 раз; г – 30000 раз

К **нормируемым показателям качества** гипсовых вяжущих веществ (по ГОСТ 125) относятся: степень помола, сроки схватывания и марка по прочности.

В зависимости **от степени помола** они подразделяются на три вида:

I – **грубого помола** (остаток на сите не более 23 %);

II – **среднего помола** (остаток на сите не более 14 %);

III – **тонкого помола** (остаток на сите не более 2 %).

Степень помола оценивается путем просеивания пробы гипсового

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

Истинная плотность гипсовых вяжущих веществ составляет 2600-2750 кг/м^3, насыпная плотность в рыхлом состоянии – 800-1100 кг/м^3, в уплотненном состоянии – 1250-1450 кг/м^3.

Водопотребность гипсовых вяжущих веществ выражается количеством воды в % массы вяжущего, необходимым для получения **гипсового теста стандартной консистенции**, которое используется при определении сроков схватывания и марки гипсового вяжущего по прочности.

Водопотребность гипсового вяжущего не нормируется, определяется подбором (на вискозиметре Суттарда) и существенно влияет на прочность и сроки схватывания гипса: чем она выше, тем больше сроки схватывания и ниже прочность.

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

По срокам схватывания они делятся на три группы:

А – **быстротвердеющие** (начало схватывания не ранее 2 мин, конец – не позднее 15 мин);

Б – **нормальнотвердеющие** (начало схватывания не ранее 6 мин, конец – не позднее 30 мин);

В – **медленнотвердеющие** (начало схватывания не ранее 20 мин, конец – не нормируется).

Сроки схватывания гипсового вяжущего определяются при помощи прибора Вика с иглой на гипсовом тесте стандартной консистенции. Сроки схватывания можно регулировать введением добавок – замедлителей схватывания, например борной, лимонной, винной или уксусной кислот.

В зависимости от предела прочности при изгибе ($R_{изг.}$) и сжатии ($R_{сж.}$) установлены **12 марок по прочности** гипсовых вяжущих веществ: Г-2, Г-3, Г-4, Г-5, Г-6, Г-7, Г-10, Г-13, Г-16, Г-19, Г-22, Г-25, для которых минимальное значение $R_{сж.}$ должно быть соответственно 2; 3; 4; 5; 6; 7; 10; 13; 16; 19; 22; 25 МПа, а $R_{изг.}$ – 1,2; 1,8; 2; 2,5; 3; 3,5; 4,5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8 МПа.

Марка по прочности гипсового вяжущего определяется по результатам испытания на изгиб трех образцов-балочек размером 4×4×16 см и испытания на сжатие шести половинок образцов-балочек, изготовленных из гипсового теста стандартной консистенции (диаметром расплыва на вискозиметре Суттарда 175-185 мм) и твердевших на воздухе в течение 2 часов после добавления гипса в воду.

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

Теоретически для гидратации полуводного гипса с образованием двуводного гипса требуется 18,6 % воды от массы гипсового вяжущего. Практически для получения удобоформуемой смеси строительный гипс требует 50-70 % воды, высокопрочный гипс – 30-40 %.

Химически несвязанная вода формирует высокую пористость гипсового камня – 40-60 %.

Средняя плотность гипсового камня составляет 1200-1500 кг/м^3.

Свежеизготовленные гипсовые изделия содержат много химически несвязанной воды, снижающей их прочность. Для повышения прочности изделия сушат при температуре 60-70 °С.

Водостойкость гипсовых вяжущих веществ оценивается по **коэффициенту размягчения** ($К_р$), в зависимости от которого они делятся на:

- **неводостойкие** ($К_р$ менее 0,45);
- **средней водостойкости** ($К_р$ от 0,45 до 0,6);
- **повышенной водостойкости** ($К_р$ от 0,6 до 0,8);
- **водостойкие** ($К_р$ более 0,8).

Неводостойкость гипса объясняется высокой растворимостью двугидрата сульфата кальция, его высокой проницаемостью и расклинивающим действием молекул воды при проникании в межкристаллические полости (эффект Ребиндера).

Структура затвердевшего гипсового камня характеризуется высокой сообщающейся пористостью, удлиненными кристаллами двугидрата сульфата кальция, которые имеют между собой точечные соединения, имеющие тенденцию к разрыву при небольших напряжениях, и полости, в которые проникает вода, ослабляя связи и растворяя двугидрат.

Для повышения водостойкости гипсовых вяжущих веществ широко используются тонкодисперсные минеральные добавки природного (диатомит, опока, трепел, пуццолана, цеолит, шунгит и др.) и искусственного (портландцемент, известь, метакаолин, микрокремнезем, керамзитовая и металлургическая пыль, отходы мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов и др.) происхождения как отдельно, так и в комплексе с органическими модификаторами (гипер- и суперпластификаторами, гидрофобизаторами, углеродными нанотрубками, микрокристаллической целлюлозой и др.).

По механизму воздействия на гипсовый камень все добавки условно подразделяются на следующие виды:

- сильные (слабые) электролиты (не электролиты), которые влияют на растворимость гипса;
- соединения, выступающие как готовые центры кристаллизации;
- поверхностно-активные вещества, способные к адсорбции на полугидрате сульфата кальция и уменьшающие скорость зародышеобразования;
- модификаторы, которые при взаимодействии с гипсом формируют на поверхности его кристаллогидратов труднорастворимые фазовые пленки.

Подбирая ту или иную добавку для гипсовых вяжущих, руководствуются ее ролью в:

- образовании мало- или нерастворимых соединений, формирующих

малопористую структуру гипсового камня;

- формировании водонепроницаемых пленок, экранирующих негативное воздействие воды;

- блокировании поверхности кристаллогидратов, задержке роста и изменении их размеров и формы, увеличении общей площади контактов между ними.

К недостаткам гипсовых вяжущих веществ относятся ползучесть влажного гипсового камня и коррозия стальной арматуры.

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

Гипсовые вяжущие маркируются по трем показателям: прочности, срокам схватывания и тонкости помола. Например, **гипсовое вяжущее Г-7 А II ГОСТ 125** – быстротвердеющее (А), среднего помола (II), прочностью при сжатии не менее 7 МПа.

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

3.2 Строительная воздушная известь

Известь – оксид кальция (CaO) и оксид магния (MgO), образуемые при термическом разложении (декарбонизации) природных карбонатов кальция $CaCO_3$ (известняка, мела, ракушечника) или кальция-магния $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ (доломита, доломитизированного известняка).

По назначению в народном хозяйстве известь подразделяют на **строительную**, предназначенную для изготовления строительных материалов и изделий, и **технологическую**, используемую в технологических процессах (при выплавке стали и др.).

По условиям твердения различают два вида строительной извести: **воздушную**, твердеющую только в воздушно-сухих условиях под воздействием диоксида углерода (CO_2), и **гидравлическую**, способную твердеть в воде или на воздухе при смешивании с водой, состоящую из гидроксида кальция, а также силикатов и алюминатов кальция.

Строительная воздушная известь является продуктом умеренного обжига (ниже температуры спекания) кальциево-магниевых карбонатных горных пород (зернисто-кристаллического мраморовидного, плотного кристаллического, оолитового, доломитизированного известняков; землисто-рыхлого известняка (или мела); известнякового туфа; известняка-ракушечника; доломита) с содержанием глины не более 6-8 %.

Глинистые примеси, входящие в состав известняков, вступают в химическое взаимодействие с CaO, образуя низкоосновные силикаты, алюминаты и ферриты. При значительном содержании этих соединений в извести она приобретает гидравлические свойства.

О возможной гидравлической активности извести можно судить по значению **модуля основности**:

$$M_0 = CaO / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3), \quad (3.5)$$

где CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 – процентное содержание соответствующих оксидов.

При M_0 более 9 известь является воздушной, 4,5-9 – слабогидравлической, 1,7-4,5 – сильногидравлической.

Технологический процесс производства строительной воздушной извести включает в себя следующие операции:

- доставку и складирование кальциево-магниевого карбонатного сырья;

- подготовку (дробление, сортировка) и обжиг сырья (образование комовой извести);

- получение дробленой и порошкообразной извести;

- складирование, упаковку, маркировку и транспортирование готовой продукции.

Основной технологической операцией в производстве строительной воздушной извести является **обжиг**, целью которого являются возможно полное термическое разложение (декарбонизация) $CaCO_3$, $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ на оксиды CaO, MgO, CO_2 и получение высококачественной продукции с оптимальной микроструктурой и пористостью.

Обжиг кальциево-магниевого карбонатного сырья фракций 40-80 мм и 80-120 мм осуществляют в шахтных печах, а фракций 5-20 мм и 20-40 мм – во вращающихся печах.

Шахтная печь представляет собой установленную вертикально на фундаменте шахту, снабженную в верхней части устройством для загрузки подготовленного сырья, а в нижней – механизмом для выгрузки продукта обжига (рис. 3.3).

Движущийся в шахте сверху-вниз сырьевой материал проходит последовательно три технологические зоны: подогрева, обжига и охлаждения.

В **зоне подогрева** (верхняя часть печи) с температурой печного пространства не выше 850 °С материал подсушивается, подогревается и в нем выгорают органические примеси.

В **зоне обжига** (средняя часть печи) температура обжигаемого материала изменяется от 850 до 1200 °С, а затем до 900 °С. Здесь происходит разложение (декарбонизация) основного компонента кальциево-магниевого карбонатного сырья – карбоната кальция:

$$CaCO_3 \rightleftarrows CaO + CO_2\uparrow. \quad (3.6)$$

Процесс декарбонизации $CaCO_3$ является обратимым, направление которого зависит от температуры и парциального давления углекислого газа CO_2 в среде разлагающегося карбоната кальция.

В **зоне охлаждения** (нижняя часть печи) полученная известь CaO охлаждается поступающим снизу воздухом от 900 до 50-100 °С.

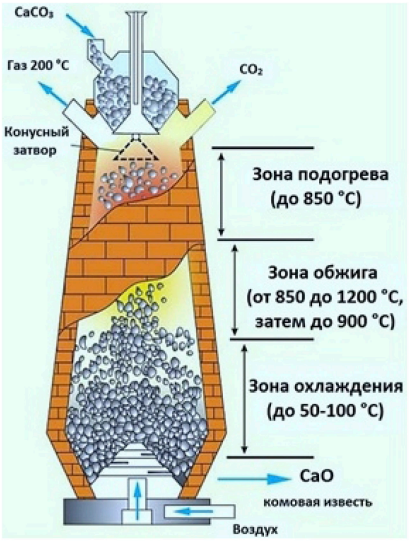


Рис. 3.3. Схема шахтной печи для обжига кальциево-магниевого карбонатного сырья

По способу обжига шахтные печи бывают пересыпными (слой обжигаемого материала пересыпан слоями твердого короткопламенного топлива); полугазовыми (горячие дымовые газы поступают в зону обжига в виде продуктов газификации твердого длиннопламенного топлива); на газообразном топливе (с устройствами для ввода и распределения в шахте природного, искусственного или смешанного газа); на жидком топливе (с устройствами для ввода, распыления и газификации мазута).

Вращающаяся печь обладает рядом преимуществ, по сравнению с шахтной, в частности большей единичной мощностью агрегата, равномерным качеством получаемой извести, возможностью обжига мелких фракций карбонатного сырья любой механической прочности и высокой влажности.

Основными недостатками вращающихся печей являются повышенный удельный расход энергоносителей и топлива на обжиг, большие капиталовложения на оборудование и сооружения, значительная металлоемкость.

Вращающаяся печь представляет собой футерованный изнутри вращающийся стальной цилиндрический барабан, установленный наклонно на 3-4 % на роликовых опорах.

Длинные вращающиеся печи применяют для производства извести сухим и мокрым способами.

При сухом способе карбонатное сырье поступает во вращающуюся печь в виде кусков фракции 5-20 мм или 20-50 мм с влажностью 2-24 %.

При мокром способе сырье (мел) поступает в печь в виде сметанообразной массы (шлама) с содержанием воды 37-43 %.

В коротких вращающихся печах обжигают карбонатные породы в виде узких фракций 0,1-2 мм, 10-20 мм и 20-40 мм с влажностью до 8 %.

Оксиды кальция и магния (CaO, MgO), которые образуются непосредственно после обжига карбоната кальция или карбоната кальция-магния в шахтной или вращающейся печах, называют **комовой негашеной известью** или **кипелкой**, имеющей вид комков, способных активно взаимодействовать с водой.

Комовая известь является полуфабрикатом для производства двух видов строительной воздушной извести по фракционному составу:

- **дробленой** (измельченной в дробилках ударного действия до зерен с максимальным размером не более 20 мм);
- ***порошкообразной*** (гашеной или молотой в шаровых, шахтных, аэробильных и других мельницах без или совместно с добавками – гранулированными доменными или электротермофосфорными шлаками, активными минеральными добавками, кварцевыми песками).

При затворении комовой извести водой происходит гашение (гидратация) с выделением значительного количества тепла Q (1160 кДж на 1 кг CaO), которое переводит часть воды в парообразное состояние:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + Q\uparrow. \quad (3.7)$$

Пар вызывает в комках извести внутренние растягивающие напряжения, под действием которых они самопроизвольно распадаются («распушаются») в тонкодисперсный порошок с размером частиц 5-20 мкм, способный при смешивании с водой образовывать пластичное тесто или молоко.

Гидроксиды кальция и магния ($Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$), получаемые в результате гашения комовой извести, называют **гашеной (гидратной) известью** или **пушонкой**.

Вследствие испарения влаги для образования пушонки требуется значительно большее количество воды, чем необходимо в соответствии с химической реакцией. Так, для гашения комовой извести в пушонку на открытом воздухе следует добавлять около 70 % воды, а не 32,13 % от массы CaO. При этом слишком большое количество воды также нежелательно, так как выделяющегося при реакции тепла будет недостаточно для превращения ее в пар, и часть воды останется в пушонке, ухудшая ее качество.

Известковое тесто получается в том случае, когда при гашении комовой извести воду вводят в количестве, превышающем теоретически необходимое в 10 раз (в среднем 2,5 л воды на 1 кг извести).

Известковое молоко образуется при введении количества воды, превышающего теоретически необходимое более чем в 10 раз.

Гашение комовой извести в пушонку, известковое тесто и молоко обычно осуществляют на предприятии-потребителе или вблизи от строительной площадки и производят ручным (опрыскиванием, погружением в воду) и механизированным (в гидраторах периодического и непрерывного действия) способами.

При хранении и транспортировании негашеной извести (комовой, дробленой, молотой) должна быть защищена от воздействия влаги и загрязнения посторонними примесями. Складирование извести осуществляют на автоматизированных складах, состоящих, как правило, из нескольких силосов, галерей с ленточными транспортерами, погрузочных машин, пневмотранспортом, а также аспирационной системой для исключения выбросов пыли.

Известь отгружают навалом или в упаковочных мешках из бумаги, полипропилена, комбинированных материалов и перевозят транспортом всех видов в соответствии с правилами перевозки грузов.

Твердение строительной воздушной извести происходит медленно и обусловлено двумя одновременно протекающими процессами:

- кристаллизация $Ca(OH)_2$ из насыщенного водного раствора;
- карбонизация $Ca(OH)_2$ под действием углекислого газа, содержащегося в воздухе:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O. \qquad (3.8)$$

Кристаллы $CaCO_3$ и $Ca(OH)_2$ срастаются между собой, образуя известковый камень.

Для улучшения процесса карбонатного твердения, а также снижения усадочных деформаций воздушной извести применяют в виде раствора с соотношением (по объему) известкового теста и заполнителя (кварцевого песка и др.) от 1:3 до 1:5.

К **нормируемым показателям свойств** строительной воздушной извести (по ГОСТ 9179) относятся: суммарное содержание активных оксидов кальция и магния (CaO + MgO); содержание активного оксида магния (MgO), углекислого газа (CO_2), непогасившихся зерен; время гашения; влажность; крупность фракции; равномерность изменения объема; удельная эффективная активность естественных радионуклидов (не более 370 Бк/кг).

Суммарное содержание активных (CaO + MgO) – показатель, характеризующий **активность** (способность к гашению) извести и определяемый титриметрическим методом с использованием стандартной бюретки, закрепленной в штативе, и конической колбы.

Негашеная строительная воздушная известь в зависимости от содержания активного оксида магния подразделяется на следующие виды:

- **кальциевая** (MgO не более 5 %);
- **магнезиальная** (MgO от 5 до 20 %);
- **доломитовая** (MgO от 20 до 40 %).

Содержание активного MgO устанавливается трилонометрическим методом с использованием для титрования извести 0,1 н раствора трилона Б – натриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$.

Для определения **содержания CO_2** применяется весовой метод (вычисление процентного отношения разности масс извести после прокаливания в муфельной печи при температуре 520 и 975 °С к первоначальной массе) и газообъемный метод (измерение на кальциметре выделившегося углекислого газа в результате воздействия соляной кислоты на карбонаты кальция и магния).

Непогасившиеся зерна, представляющие собой недожог (неразложившиеся при обжиге $CaCO_3$, $CaCO_3 \cdot MgCO_3$) и пережог (остеклованные плотные трудногасящиеся CaO, MgO), приводят к снижению качества воздушной извести.

Зерна недожога отощают известковое тесто и снижают его пластичность. Зерна пережога очень медленно гидратируются с увеличением своего объема, что может вызвать внутренние механические напряжения и растрескивание материалов и изделий на основе извести.

В зависимости от суммарного содержания активных (CaO + MgO), содержания активного MgO, CO_2 и НЗ негашеную строительную воздушную известь без добавок подразделяют на три сорта, а негашеную порошкообразную известь с добавками – на два сорта (табл. 3.1).

Время гашения – показатель, характеризующий скорость гашения извести и определяемый как время от момента добавления воды в термосную колбу с заранее вычисленной навеской известкового порошка до момента достижения максимальной температуры и начала ее снижения.

Таблица 3.1

Показатели сорта негашеной строительной воздушной извести

Наименование показателя	Значение, %, по массе					
	кальциевая известь			магнезиальная и доломитовая известь		
	1 сорт	2 сорт	3 сорт	1 сорт	2 сорт	3 сорт
Активные (CaO + MgO), не менее:						
без добавок	90	80	70	85	75	65
с добавками	65	55	-	60	50	-
Активный MgO, не более	5	5	5	20 (40)	20 (40)	20 (40)
CO_2, не более:						
без добавок	3	5	7	5	8	11
с добавками	4	6	-	6	9	-

Непогасившиеся зерна, не более	7	11	14	10	15	20

Примечание: в скобках указано содержание MgO для доломитовой извести.

Негашеная строительная воздушная известь по времени гашения подразделяется на:

- **быстрогасящуюся** (не более 8 мин);
- **среднегасящуюся** (не более 25 мин);
- **медленногасящуюся** (более 25 мин).

В зависимости от температуры гашения различаются:

- **низкоэкзотермическая известь** (ниже 70 °С);
- **высокоэкзотермическая известь** (выше 70 °С).

Влажность гашеной извести не должна быть более 5 %.

Крупность фракции порошкообразной извести должна быть такой, чтобы при просеивании пробы извести остаток на сите № 02 составлял не более 2 %, а остаток на сите № 009 – не более 15 % массы просеиваемой пробы.

Строительная воздушная известь применяется при изготовлении сухих строительных смесей и строительных растворов для каменной кладки, монтажных, облицовочных и штукатурных работ в воздушно-сухих условиях.

Известковые растворы имеют низкую прочность. Так, предел прочности при сжатии через 28 суток твердения растворов на гашеной извести составляет 0,5-1 МПа, а растворов на порошкообразной негашеной извести – до 5 МПа. Поэтому, в отличие от других вяжущих веществ, воздушная известь не имеет марок (классов) по прочности (данный показатель не нормируется).

Строительная воздушная известь является сырьевым компонентом для производства силикатных кирпича, камней, блоков и перегородочных плит, изделий и конструкций из ячеистых бетонов автоклавного твердения, а также входит в состав композиционных вяжущих веществ, сухих строительных смесей, красок.

3.3 Общестроительные цементы

Цемент – порошкообразное вяжущее вещество, обладающее гидравлическими свойствами (способностью после затворения водой и предварительного твердения на воздухе или без него продолжать твердеть в воде и на воздухе), состоящее из клинкера, природного гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) для регулирования сроков схватывания и, при необходимости, минеральных, специальных и технологических добавок.

Цементы классифицируются по следующим основным признакам: назначение; вид клинкера; вещественный состав; прочность на сжатие; скорость твердения; сроки схватывания.

По **назначению** цементы подразделяются на:

- общестроительные, основным требованием к которым является обеспечение прочности и долговечности бетонов или строительных растворов;
- специальные, к которому наряду с обеспечением прочности предъявляются специальные требования.

По **виду клинкера** цементы различаются на изготовленные на основе:

- портландцементного клинкера;
- глиноземистого (высокоглиноземистого) клинкера;
- смеси портландцементного и сульфоалюминатного (сульфоферритного) клинкера.

Цементный клинкер – продукт, получаемый обжигом до спекания или плавления сырьевой смеси надлежащего состава и содержащий главным образом высокоосновные силикаты и (или) высоко- или низкоосновные алюминаты кальция.

Портландцементный клинкер – клинкер, состоящий преимущественно из высокоосновных силикатов кальция, а также алюминатов и алюмоферритов кальция.

Глиноземистый (высокоглиноземистый) клинкер – клинкер, состоящий преимущественно из низкоосновных алюминатов кальция.

Сульфоалюминатный (сульфоферритный) клинкер – клинкер, состоящий преимущественно из сульфоалюминатов (сульфоферритов) кальция.

По **вещественному составу** цементы на основе портландцементного клинкера подразделяются на типы, характеризующиеся различным видом и содержанием минеральных добавок:

- **тип I** – портландцемент, содержащий в качестве основного компонента вещественного состава только портландцементный клинкер;
- **тип II/A** – портландцемент с минеральными добавками, содержащий в качестве основных компонентов портландцементный клинкер и минеральную добавку или смесь минеральных добавок в количестве от 6 до 20 %;
- **тип II/B** – портландцемент с минеральными добавками, содержащий в качестве основных компонентов портландцементный клинкер и шлак в количестве от 21 до 35 %;
- **тип III** – шлакопортландцемент, содержащий в качестве основных компонентов портландцементный клинкер и доменный гранулированный, электротермофосфорный или топливный шлак в количестве от 36 до 65 %;
- **тип IV** – пуццолановый цемент, содержащий в качестве основных компонентов портландцементный клинкер и пуццолану в количестве от 21 до 35 %;
- **тип V** – композиционный цемент, содержащий в качестве основных компонентов портландцементный клинкер, смесь шлака и пуццоланы и (или) золы-уноса в количестве от 22 до 60 %.

По **прочности на сжатие** цементы выпускаются следующих классов: 22,5; 32,5; 42,5; 52,5.

По **скорости твердения** общестроительные цементы делятся на подклассы прочности:

- нормальнотвердеющие (Н) с нормированием прочности в возрасте 2 (7) и 28 суток;
- быстротвердеющие (Б) с нормированием прочности в возрасте 2 суток, повышенной по сравнению с нормальнотвердеющими, и 28 суток;

- медленнотвердеющие (М) с нормированием начальной прочности в возрасте 7 (2) суток, пониженной по сравнению с нормальнотвердеющими цементами, и 28 суток.

По **срокам схватывания** цементы подразделяются на:

- медленносхватывающиеся (с нормируемым сроком начала схватывания более 2 ч);
- нормальносхватывающиеся (с нормируемым сроком начала схватывания от 45 мин до 2 ч);
- быстросхватывающиеся (с нормируемым сроком начала схватывания менее 45 мин).

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

Портландцементный клинкер – зернистый материал размером гранул 10-40 мм, получаемый обжигом до спекания при температуре до 1450 °С тщательно подобранной сырьевой смеси из карбонатного сырья с высоким содержанием кальцита $CaCO_3$ (известняк, мел и др.) и глинистых пород (глина, глинистые сланцы) – водных алюмосиликатов с общей формулой $Al_2O_3 \cdot nSiO_2 \cdot mH_2O$.

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

Изобретение портландцемента связано с именами английского каменщика Дж. Аспдина, получившего в 1824 г. патент, и русского строителя Е.Г. Челиева, который изобрел цемент, наиболее схожий с современным портландцементом в 1825 г.

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

Для производства портландцемента применяется портландцементный клинкер, в котором суммарное содержание трехкальциевого и двухкальциевого силикатов ($3CaO \cdot SiO_2 + 2CaO \cdot SiO_2$) составляет не менее 2/3 массы клинкера, а массовое отношение оксида кальция к оксиду кремния (CaO/SiO_2) – не менее 2. Содержание оксида магния (MgO) в нем не должно быть более 5 % массы клинкера.

В качестве минеральных добавок (основных компонентов портландцемента) используются гранулированный доменный или электротермофосфорный шлак, пуццоланы, глиежи, микрокремнезем, зола-уноса, обожженный сланец, белитовый (нефелиновый) шлам, известняк.

Гранулированный доменный шлак получается путем быстрого охлаждения шлакового расплава соответствующего состава, который образуется в доменной печи при плавке чугуна, а **гранулированный электротермофосфорный шлак** – путем быстрого охлаждения силикатного

расплава, образующегося при производстве фосфора методом возгонки в электропечах.

Доменные и электротермофосфорные гранулированные шлаки содержат по меньшей мере 2/3 остеклованного шлака и при определенных условиях проявляют гидравлические свойства.

Пуццолана – материал силикатного или алюмосиликатного состава или их комбинация.

Пуццоланы не твердеют самостоятельно при затворении водой, однако в тонкоизмельченном виде и в присутствии воды при нормальной температуре реагируют с раствором гидроксида кальция $Ca(OH)_2$, образуя гидросиликаты и гидроалюминаты кальция, обусловливающие прочность твердеющего материала. Образующиеся гидросиликаты и гидроалюминаты кальция аналогичны тем, которые образуются при твердении гидравлических вяжущих веществ.

Пуццоланы состоят преимущественно из реакционноспособных оксида кремния (SiO_2) и оксида алюминия (Al_2O_3), остальное – оксид железа (Fe_2O_3) и другие оксиды.

Пуццоланы подготавливаются следующим образом: в зависимости от природного и производственного состояния они гомогенизируются, высушиваются или подвергаются термообработке и измельчению.

Природная пуццолана является материалом осадочного (диатомиты, трепелы, опоки) или вулканического (пеплы, туфы, трассы, вулканические шлаки, цеолиты и цеолитизированные породы) происхождения соответствующего химико-минералогического состава.

Глиежи – термически активированные вулканические породы и глины, горелые породы, сланцы или осадочные породы.

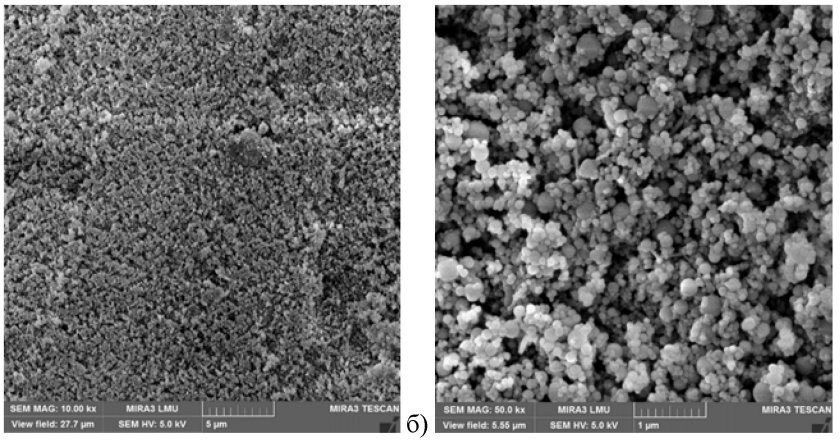


Рис. 3.4. Микрокремнезем при увеличении:
а – в 10000 раз; б – в 50000 раз

Микрокремнезем образуется при восстановлении высокочистого кварца углем в дуговых печах при изготовлении кремния и ферросилиция и состоит из очень мелких сферических частиц (рис. 3.4), содержащих аморфный или стеклообразный оксид кремния (SiO_2) в количестве не менее 85 % массы добавки. Содержание элементарного кремния (Si) в микрокремнеземе не должно превышать 0,4 % по массе.

Для совместного измельчения с портландцементным клинкером и природным гипсом микрокремнезем применяется в исходном, уплотненном состоянии либо в виде брикетов, полученных прессованием с увлажнением.

Зола-уноса получается электростатическим или механическим осаждением пылевидных частиц из отходящих газов агрегатов, в которых сжигают измельченный уголь или горючий сланец.

По своему химическому составу она может быть кислой и основной. Первая проявляет пуццоланические свойства, вторая может дополнительно проявлять гидравлические свойства.

Кислая зола-уноса представляет собой тонкодисперсный материал, состоящий преимущественно из сферических частиц (рис. 3.5), обладающий пуццоланическими свойствами и состоящий в основном из реакционноспособных SiO_2 и Al_2O_3.

Основная зола-уноса – тонкодисперсный материал, проявляющий гидравлические и (или) пуццоланические свойства и состоящий в основном из реакционноспособных CaO, SiO_2 и Al_2O_3.

Обожженный сланец, в том числе обожженный нефтяной сланец, получается путем обжига исходного материала в специальных печах при температурах около 800 °С. В зависимости от состава исходного материала и условий обжига обожженный сланец содержит клинкерные минералы: двухкальциевый силикат и монокальциевый алюминат, свободный оксид кальция $CaO_{св}$ и пуццоланически активные оксиды, например SiO_2. При тонком измельчении обожженный сланец способен к гидравлическому твердению, как портландцемент, а также обладает пуццоланическими свойствами.

Белитовый (нефелиновый шлам) – отход производства оксида алюминия из нефелинов, сиенитов и других горных пород. Состоит в основном из двухкальциевого силиката (белита).

Титр **известняка**, используемого в качестве минеральной добавки для портландцемента, должен быть не менее 75 %.

В качестве **специальных** и **технологических добавок** применяются органические или неорганические материалы, предназначенные для интенсификации процесса помола или улучшения подвижности порошка цемента.

Производство портландцемента – технологически сложный и энергоемкий процесс, который можно разделить на две основные стадии: первая – производство портландцементного клинкера, вторая – помол клинкера

совместно с природным гипсом и добавками.

а) б)

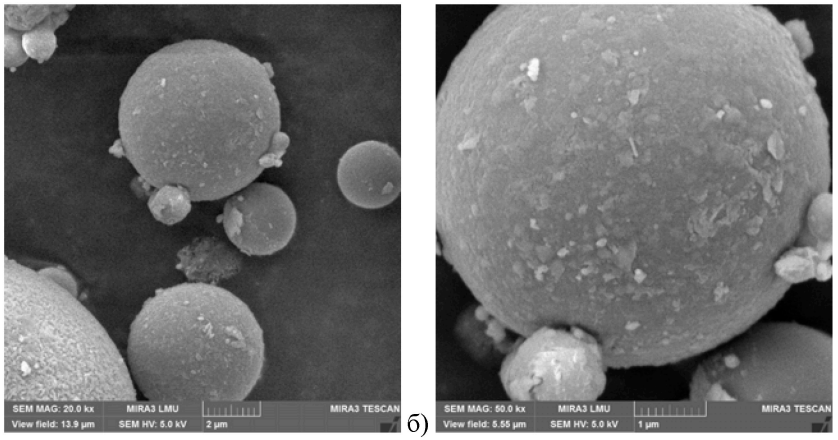


Рис. 3.5. Кислая зола-уноса при увеличении:
а – в 20000 раз; б – в 50000 раз

Получение портландцемента может осуществляться сухим, мокрым (рис. 3.6) и комбинированным способом.

Сухой способ заключается в приготовлении сырьевой муки (в виде порошка) из сухих или предварительно высушенных компонентов с остаточной влажностью 1-2 %. Сухой способ в 1,5-2 раза менее энергоемок, чем мокрый.

При **мокром способе** сырьевые материалы измельчаются и смешиваются в присутствии воды, поэтому смесь получается в виде вязкотекучей массы – шлама (от нем. schlamm – грязь) с влажностью от 35 до 45 %. Это наиболее энергоемкий способ.

Комбинированный способ заключается в том, что приготовленный шлам до поступления в печь обезвоживается на фильтрах до влажности 16-18 %.

Энергоемкость производства в целом остается высокой, однако, данный способ позволяет на 20-30 % снизить расход топлива, по сравнению с мокрым способом.

Обжиг сырьевой смеси осуществляется во вращающихся печах, работающих по принципу противотока (сырье движется навстречу раскаленным продуктам сгорания топлива). Печь диаметром 5-7 м имеет небольшой наклон (3-5°) и вращается со скоростью 1–2 об/мин. При мокром способе производства длина печи достигает 185-230 м.

Двигаясь от верхнего конца печи (холодного) к нижнему (горячему, со стороны которого подается топливо), сырье проходит различные температурные зоны, в каждой из которых происходят физико-химические превращения, в результате чего и получается портландцементный клинкер.

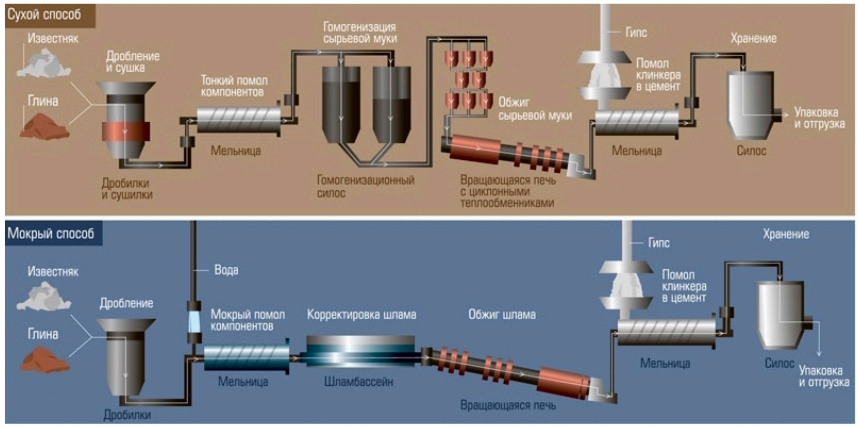


Рис. 3.6. Сухой и мокрый способы производства портландцемента

После испарения свободной воды, выгорания органических примесей и удаления химически связанной воды из глинистых минералов происходит декарбонизация $CaCO_3$ (900-1100 °С) с образованием большого количества CaO и одновременно разложение дегидратированных глинистых минералов на оксиды Al_2O_3, SiO_2, Fe_2O_3.

Образовавшиеся оксиды вступают в химическое взаимодействие с образованием новых минералов $3CaO \cdot Al_2O_3$, $CaO \cdot Al_2O_3$ и частично $2CaO \cdot SiO_2$.

При температуре 1100-1250 °С происходят твердофазовые реакции образования минералов $3CaO \cdot Al_2O_3$, $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ и $2CaO \cdot SiO_2$.

Наивысшего значения (1300-1450 °С) температура обжига достигает в зоне спекания, где происходит частичное плавление сырья и образуется главный минерал клинкера – алит $3CaO \cdot SiO_2$.

В последней зоне печи клинкер охлаждается до 1000 °С путем вдувания холодного воздуха, а при выходе из печи поступает в холодильник, где интенсивно охлаждается холодным воздухом.

Помол клинкера с добавкой природного гипса осуществляется в многокамерных шаровых мельницах при помощи загруженных в барабан мелющих тел – шаров (при грубом помоле) или цилиндров (при мелком помоле).

Химический состав портландцементного клинкера выражается содержанием следующих оксидов, в % по массе: CaO – 63-66, SiO_2 – 21-24, Al_2O_3 – 4-8, Fe_2O_3 – 2-4. В небольших количествах в клинкере присутствуют MgO, SO_3, Na_2O, K_2O, TiO_2, Cr_2O_3, P_2O_5.

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

Суммарное содержание щелочных оксидов (Na_2O и K_2O) не должно

превышать 0,6 %, так как они могут явиться причиной коррозии бетона и существенно замедлять схватывание портландцемента.

Минералогический состав портландцементного клинкера представлен содержанием, в % по массе:

- **трехкальциевого силиката (алита)** – $3CaO \cdot SiO_2$ (C_3S) – 45-60 – основной минерал, определяет скорость твердения, прочность и другие свойства портландцемента;
- **двухкальциевого силиката (белита)** – $2CaO \cdot SiO_2$ (C_2S) – 20-30 – медленно твердеет, но достигает высокой прочности при длительных сроках твердения;
- **трехкальциевого алюмината (целита)** – $3CaO \cdot Al_2O_3$ (C_3A) – 4-12 – быстро гидратируется и твердеет, но конечная прочность его небольшая;
- **четырехкальциевого алюмоферрита (феррита)** – $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ (C_4AF) – 10-20 – по скорости твердения занимает промежуточное положение между C_3S и C_2S.

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

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

Использование минеральных и органических добавок позволяет направленно изменять свойства портландцемента, экономить клинкер, уменьшать расход цементного вяжущего в бетоне.

Добавки обладают разным механизмом действия: при твердении цемента могут вступать в химическое взаимодействие с продуктами гидратации портландцемента (активные минеральные добавки), влиять на пластичность бетонных и растворных смесей (добавки поверхностно-активных веществ), выступать в роли наполнителей и др.

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

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

Теория твердения портландцемента разработаны А.А. Байковым и дополнены В.А. Киндом, В.Н. Юнгом, Ю.М. Буттом, В.В. Тимашевым, А.В. Волженским и другими. При твердении различают три периода: **растворение**,

коллоидация и **кристаллизация**.

В первый период при затворении портландцемента водой происходит растворение клинкерных минералов и образование насыщенного по отношению к ним раствора.

Во втором периоде в насыщенном растворе протекают реакции гидратации клинкерных минералов. Образуются гидратные новообразования в коллоидном виде, повышается вязкость цементного теста, что обусловливает его схватывание.

В третьем периоде протекают процессы кристаллизации, сопровождающиеся твердением цементного теста и ростом прочности образовавшегося **цементного камня**.

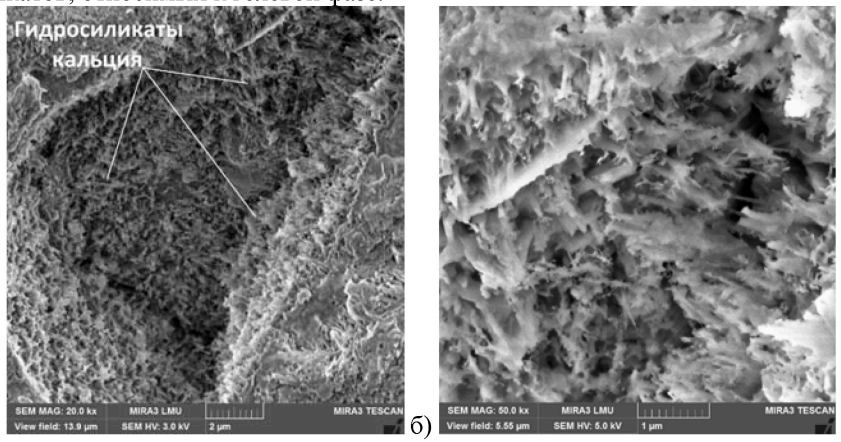
Все три периода происходят одновременно.

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

$$2(3CaO\cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2; \quad (3.9)$$

$$2(2CaO\cdot SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O + Ca(OH)_2. \quad (3.10)$$

Гидросиликаты кальция – основной продукт твердения портландцемента – практически нерастворимы в воде (рис. 3.7). Они выделяются из раствора в виде геля, который со временем кристаллизуется. Этот гель пронизывают, укрепляя его, кристаллы $Ca(OH)_2$. Содержание **портландита** (рис. 3.8) в продуктах гидратации портландцемента может составлять до 15-20 %. Молярное соотношение CaO/SiO_2 в гидросиликатах, образующихся в цементном камне, может изменяться в зависимости от состава материала, условий твердения и других обстоятельств. Поэтому применяется термин C-S-H для всех полукристаллических и аморфных гидратов кальциевых силикатов, относимых к гелевой фазе.

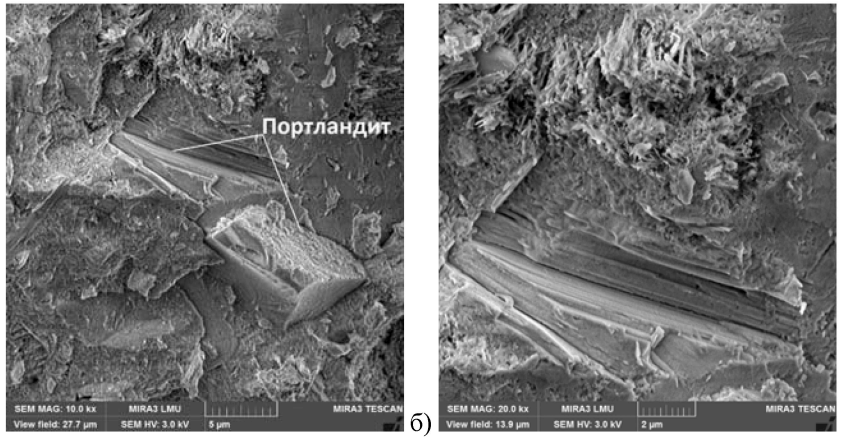


а) б)

Рис. 3.7. Гидросиликаты кальция в структуре цементного камня при увеличении: а – в 20000 раз; б – в 50000 раз

Гидросиликаты кальция низкой основности, имеющие состав $(0,8\text{-}1,5)CaO\cdot SiO_2\cdot(1\text{-}2,5)H_2O$ обозначаются (по Тейлору) формулой C-S-H (I), **гидросиликаты высокой основности** $(1,5\text{-}2)CaO\cdot SiO_2\cdot nH_2O$ – формулой C-S-H (II).

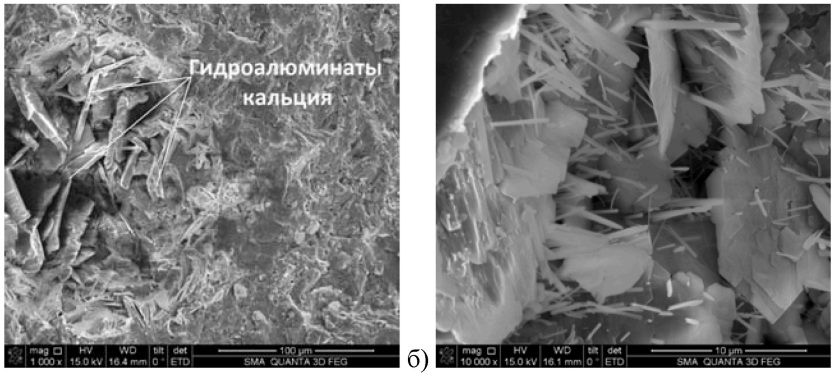
Образование низкоосновных гидросиликатов кальция способствует повышению прочности цементного камня, а высокоосновных – снижению. При автоклавной обработке (в среде насыщенного пара при давлении 0,8-1,3 МПа и температуре 175-200 °С), образуется хорошо оформленные кристаллы **тоберморита** $5CaO\cdot 6SiO_2\cdot 5H_2O$, которые упрочняют цементный камень.



а) б)

Рис. 3.8. Портландит в структуре цементного камня при увеличении: а – в 10000 раз; б – в 20000 раз

Основной алюмосодержащей фазой в портландцементе является трехкальциевый алюминат $3CaO\cdot Al_2O_3$. Он представляет самую активную фазу среди клинкерных минералов. Немедленно после соприкосновения $3CaO\cdot Al_2O_3$ с водой на поверхности непрореагировавших частиц образуется рыхлый слой **метастабильных (неустойчивых) гидроалюминатов кальция** $4CaO\cdot Al_2O_3\cdot 19H_2O$ и $2CaO\cdot Al_2O_3\cdot 8H_2O$ в виде тонких гексагональных пластинок, образующих по Р. Кондо и М. Даймону «структуру карточного домика» (рис. 3.9).



а) б)

Рис. 3.9. Метастабильные гидроалюминаты кальция в структуре цементного камня при увеличении: а – в 1000 раз; б – в 10000 раз

Рыхлая структура метастабильных гидроалюминатов кальция ухудшает морозостойкость, а также стойкость против химической коррозии. Это одна из причин ограничения количества трехкальциевого алюмината в специальных портландцементах, применяемых для морозостойких бетонов.

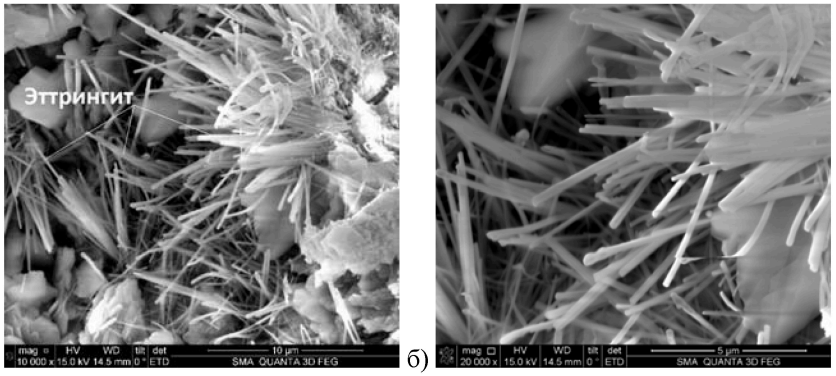
Стабильная форма – **шестиводный гидроалюминат** $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$, кристаллизующийся в кубической форме, образуется в результате быстро протекающей химической реакции:

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O = 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O. \quad (3.11)$$

Для замедления схватывания при помоле портландцементного клинкера добавляется небольшое количество природного гипса (3-5 % массы портландцемента). Двугидрат сульфата кальция ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) играет роль химически активной составляющей, реагирующей с трехкальциевым алюминатом и связывающей его в гидросульфоалюминат кальция (**эттрингит**) в начале гидратации:

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 3(CaSO_4 \cdot 2H_2O) + 26H_2O = 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O. \quad (3.12)$$

В насыщенном растворе $Ca(OH)_2$ эттрингит сначала выделяется в коллоидном тонкодисперсном состоянии, осаждаясь на поверхности частиц $3CaO \cdot Al_2O_3$, замедляет их гидратацию и продлевает схватывание цементного теста. Кристаллизация $Ca(OH)_2$ из пересыщенного раствора понижает концентрацию гидроксида кальция в растворе и эттрингит уже образуется в виде длинных иглоподобных кристаллов (рис. 3.10).



а) б)

Рис. 3.10. Эттрингит в структуре цементного камня при увеличении: а – в 10000 раз; б – в 20000 раз

Кристаллы эттрингита обусловливают раннюю прочность цементного камня. Эттрингит, содержащий 31-32 молекулы кристаллизационной воды, занимает примерно вдвое больший объем по сравнению с суммой объемов реагирующих веществ (C_3A и $CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Заполняя поры цементного камня, эттрингит при оптимальной дозировке природного гипса повышает его механическую прочность. Структура цементного камня улучшается еще и потому, что предотвращается образование в нем слабых мест в виде рыхлых гидроалюминатов кальция.

Эттрингит взаимодействует с $3CaO \cdot Al_2O_3$, оставшимся после израсходования добавки гипса, с образованием моносульфата кальция:

$$2(3CaO \cdot Al_2O_3) + 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O + 22H_2O = 3(3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 18H_2O). \quad (3.13)$$

В результате введения в портландцемент двугидрата сульфата кальция гидроалюминаты кальция заменяются гидросульфоалюминатом.

При взаимодействии с водой четырехкальциевого алюмоферрита образуются гидроалюминат и **гидроферрит кальция**:

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + mH_2O = 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot nH_2O. \quad (3.14)$$

Реакции гидратации клинкерных минералов экзотермические. По интенсивности тепловыделения минералы можно расположить в следующей последовательности: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$.

Выделяющийся при гидратации портландцемента портландит $Ca(OH)_2$ создает в твердеющей системе щелочную среду (pH 12-12,5), что предотвращает коррозию стальной арматуры в бетоне (порог коррозии арматурной стали при pH 11,8).

В то же время, водорастворимый $Ca(OH)_2$ является «слабым звеном» с

точки зрения коррозии цементного камня в бетоне.

Портландцемент в состоянии химически связать строго определенное количество воды – максимально 25-30 %, фактически к возрасту 28 суток это значение составляет 15 %. Лишняя вода образует в ЦК капиллярные поры, что ведет к снижению его прочности. Поэтому в современной технологии бетона практически всегда используют пластификаторы – поверхностно-активные вещества (ПАВ), позволяющие при сохранении заданной подвижности бетонной смеси снизить ее водопотребность на 25-40 %.

Наряду с гидратными новообразованиями цементный камень включает непрореагировавшую часть зерен портландцемента, содержание которых с течением времени уменьшается. Так, зерна размером до 5 мкм почти полностью гидратируются в течение 1-3 суток, а до 10 мкм – через месяц.

Цементный камень пронизан порами размером от 0,1 до 100 нм. В зависимости от размера поры делится на три группы: **микропоры** (меньше 2 нм); **мезопоры** (2-50 нм); **макропоры** (больше 50 нм).

С учетом происхождения поры классифицируются на группы: **гелевые** (0,5-30 нм); **капиллярные** и **контракционные** (30-50 мкм); **микровоздушные** (0,1-1 мм); **поры недоуплотнения** (более 1 мм).

Распределение пор в цементном камне зависит также от температурно-влажностных условий твердения портландцемента, его минералогического состава, длительности твердения.

К основным **строительно-техническим свойствам** портландцемента являются истинная и насыпная плотность, тонкость помола, водопотребность, сроки схватывания, равномерность изменения объема, тепловыделение при твердении, прочность, химическая стойкость.

Истинная плотность портландцемента характеризует его массу в единице объема без учета пор и пустот, т.е. в абсолютно плотном состоянии. Она колеблется в диапазоне 3100-3200 кг/м^3.

На истинную плотность существенное влияние оказывает содержание алюмоферритной фазы (плотность C_4AF равна 3770 кг/м^3). Ее можно увеличивать, вводя в состав цементного клинкера оксиды тяжелых металлов, например, бария. Уменьшают плотность портландцемента активные минеральные добавки. Для пуццолановых и шлаковых цементов, содержащих повышенное количество минеральных добавок, плотность находится в диапазоне 2700-2900 кг/м^3.

Показатель истинной плотности портландцемента используется в различных технологических расчетах, например, при определении составов бетонных смесей. С уменьшением плотности увеличивается объем, занимаемый портландцементом при постоянной массе. Это позволяет получать более пластичные бетонные и растворные смеси.

Насыпная плотность портландцемента учитывает объем межзерновых пустот. Для портландцемента в рыхлом состоянии она колеблется в пределах 900-1100 кг/м^3, уплотненном – 1400-1700 кг/м^3.

Насыпная плотность существенно снижается при увеличении тонкости

помола портландцемента.

Показатель насыпной плотности необходим при расчете емкости складских помещений, бункеров и силосных банок для хранения портландцемента, учитывается при выборе транспортных средств для его перевозки и др.

Тонкость помола портландцемента – важнейший показатель его качества, с которым связано большинство других строительно-технических свойств. Тонкость помола устанавливается ситовым анализом, определением удельной поверхности и зернового (гранулометрического) состава.

Основным стандартным показателем, характеризирующим тонкость помола портландцемента, является остаток на сите № 008. Он характеризирует содержание фракции более 80 мкм. Этот показатель не должен быть более 15 %.

Остаток на сите № 008 не характеризирует содержание в портландцементе наиболее активных зерен, влияющих на его активность (менее 40 мкм).

Более объективным показателем тонкости измельчения портландцемента, отражающим общее содержание в нем зерен, принимающих активное участие в процессах гидратации и твердения, является величина его **удельной поверхности**, характеризирующая суммарную поверхность зерен в единице массы или объема. Этот показатель, определенный методом измерения сопротивления прохождению воздуха через слой цементного порошка (по Блейну), для рядовых портландцементов находится в пределах 280-250 м^2/кг и достигает 400-450 м^2/кг для быстротвердеющих и высокопрочных цементов.

Максимальная величина удельной поверхности, превышение которой не приводит практически к увеличению прочности цементного камня, составляет 550-600 м^2/кг.

Слишком тонкий помол может вызвать и другие нежелательные результаты: возрастают водопотребность и усадочные деформации цементного камня, возможно падение прочности, вследствие перекристаллизации гидратных новообразований.

Важным свойством портландцемента, определяющим его сохранность, изменение активности при длительном хранении является **гигроскопичность** – свойство капиллярно-пористых материалов поглощать водяной пар из воздуха.

На динамику гигроскопического поглощения влаги влияют относительная влажность и температура воздуха, удельная поверхность и химико-минералогический состав портландцемента, содержание гидрофобизирующих добавок.

Водопотребность портландцемента характеризуется нормальной густотой – количеством воды в процентах от массы цементного вяжущего, необходимой для придания цементному тесту определенной стандартной консистенции.

Такая консистенция определяется погружением в цементное тесто пестика прибора Вика. Он не должен доходить на 5-7 мм до пластинки, на

которой установлено заполненное тестом кольцо.

Нормальная густота портландцемента находится в пределах от 24 до 28 %. Она увеличивается с повышением в цементе содержания алюминатов, влагоемких минеральных добавок осадочного происхождения, таких как опока, трепел, диатомит и др. Пуццолановый портландцемент, содержащий повышенное количество таких добавок, имеет нормальную густоту 30-35 %.

Несколько увеличивает нормальную густоту портландцемента повышение его удельной поверхности.

Наиболее эффективным технологическим приемом уменьшения нормальной густоты портландцемента является введение в его состав пластифицирующих поверхностно-активных веществ.

С увеличением нормальной густоты возрастает количество избыточной воды в **цементном тесте** и капиллярная пористость цементного камня, с которой тесно связаны прочность, морозостойкость, усадка, коррозионная стойкость бетонов и растворов.

Для структурированных (неньютоновских) жидкостей, в том числе и для цементного теста, характерна **тиксотропия** – способность при механических воздействиях снижать вязкость и восстанавливать ее при прекращении этих воздействий.

На способности цементного теста к тиксотропии основана способность бетонных и растворных смесей существенно разжижаться и уплотняться при таких видах механических воздействий как вибрирование.

Схватывание цементного теста сопровождается потерей его пластичности и делится на начало и конец.

Началом схватывания цементного теста считается время, прошедшее от момента затворения, до того момента, когда игла прибора Вика не будет доходить до пластинки, на которой установлено кольцо на 1-2 мм, а **конец схватывания** – время от начала затворения до момента, когда игла будет погружаться в тесто не более чем на 1 мм.

Начало схватывания цементного теста должно наступать не ранее 45-75 мин, конец – не позднее 10 ч.

Регулирование сроков схватывания обеспечивают за счет введения в портландцемент добавки природного гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), который замедляет схватывание цементного теста.

Замедляющее действие гипса связано с образованием на поверхности зерен C_3A защитных оболочек гидросульфоалюмината. Механизм влияния гипса связан также с изменением концентрации активных центров на частичках портландцемента, которая влияет на коагуляционные процессы в цементном тесте.

Схватывание цементного теста зависит от многих факторов. Оно ускоряется с повышением температуры, уменьшением водоцементного отношения, повышением удельной поверхности портландцемента.

Помол горячего клинкера особенно в мельницах открытого цикла приводит к повышению температуры до 150 °С и выше, что вызывает

дегидратацию гипса с образованием полугидрата и растворимого ангидрита. Быстрая гидратация этих составляющих портландцемента может приводить к преждевременному загустеванию цементного теста – **ложному схватыванию**. Оно вызывает быструю потерю пластичности бетонной смеси, необходимость увеличения расхода воды, что, в конечном счете, приводит к ухудшению основных свойств бетонов и растворов.

Ложному схватыванию цементного теста также способствует высокое содержание в клинкере свободной извести и щелочей. Для устранения ложного схватывания необходимо обеспечивать охлаждение клинкера перед помолом, а также достаточную аспирацию мельниц и применение замкнутого цикла.

Процессы твердения портландцемента сопровождаются объемными изменениями при переходе из пластичного теста в камневидное состояние, которые не должны сопровождаться недопустимыми деформациями и образованием трещин.

При стандартных испытаниях портландцемента **равномерность изменения объема** оценивается визуально по деформации образцов-лепешек (диаметром 70-80 и толщиной 10 мм) из цементного теста нормальной густоты, подвергнутых кипячению после 24 ч твердения в нормальных влажностных условиях.

Основной причиной неравномерного изменения объема цементного камня является гидратация в нем оксидов кальция и магния, оставшихся в свободном состоянии после обжига клинкера.

Оксид кальция, оставшийся в цементном клинкере в свободном состоянии после прохождения реакций клинкерообразования, и особенно оксид магния, практически не вступающий при обжиге в химическое взаимодействие с кислотными оксидами, находятся в клинкере в спекшемся крупнокристаллическом виде и очень медленно реагируют с водой с образованием гидроксидов кальция и магния в цементном камне и соответствующим увеличением его объема.

При содержании MgO в клинкере более 5 % вместо кипячения испытание на равномерность изменения объема образцов-лепешек проводится при автоклавной обработке.

Портландцемент соответствует требованиям стандарта, если на лицевой стороне образцов-лепешек не обнаружено радиальных, доходящих до краев трещин или сетки мелких трещин, видимых невооруженным глазом или в лупу. Не допускаются также искривления поверхности образцов, превышающие 2 мм.

Для предотвращения неравномерности изменения объема портландцемента необходимо получать клинкер с минимальным содержанием свободных оксидов кальция и магния.

Твердение портландцемента и материалов на его основе сопровождается контракционной и влажностной усадкой.

Контракция (стяжение) является следствием реакций химического взаимодействия минералов портландцементного клинкера с водой, в результате

которых образуются гидраты, абсолютные объемы которых меньше, чем суммарные объемы безводных минералов и воды, необходимой для гидратации.

Усадка цементного камня при изменении его влажности происходит в две стадии:

- когда цементное тесто (бетонная смесь) находится в пластичном состоянии (пластическая усадка);
- по мере твердения цементного камня, бетонов и растворов.

В наибольшей мере сказывается на поведении растворов и бетонов в конструкциях влажностная или гидравлическая усадка, характерная по мере высыхания материала.

Уменьшение объема в процессе высыхания материала обусловлено прежде всего действием капиллярных сил, возникающих в цементном камне при испарении воды из капилляров.

При прочих равных условиях конечная усадка цементного камня увеличивается с повышением содержания в портландцементе C_2S, при гидратации которого образуется примерно на 25 % больше тоберморитового геля, чем из C_3S. Повышается также усадка с ростом содержания C_3A, удельной поверхности портландцемента, содержания щелочей.

Процессы твердения портландцемента сопровождаются выделением значительного количества тепла. Суммарный тепловой эффект твердения складывается из теплоты смачивания цемента, растворения клинкерных минералов и химических реакций гидратации, теплоты кристаллизации и других фазовых переходов в твердеющем цементном камне, адсорбции воды на продуктах гидратации.

Наиболее значительный вклад в общий тепловой эффект твердения портландцемента и материалов на его основе вносит **тепловыделение** или экзотермия в результате реакций его гидратации.

Химическая стойкость цементного камня определяется скоростью и глубиной коррозионных (разрушительных) процессов, вызванных действием агрессивных веществ на его составляющие, главным образом, на портландит $Ca(OH)_2$ и гидроалюминат кальция $3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O$.

Различают три вида коррозии цементного камня.

Коррозия I вида – выщелачивание $Ca(OH)_2$ при воздействии мягких вод (дождевых вод, вод горных рек, конденсата, воды оборотного водоснабжения), содержащих мало растворенных веществ.

Коррозия II вида – коррозия под воздействием кислот (кислотная коррозия). К этому виду коррозии относится углекислотная, общекислотная, магнезиальная, коррозия под действием минеральных удобрений и органических веществ.

Коррозия III вида – сульфоалюминатная коррозия, возникающая при действии на $3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O$ воды, содержащей сульфатные ионы. К третьему виду коррозии относится щелочная коррозия.

Меры защиты цементного камня от коррозии сводятся к применению цементов определенного минерального состава (сульфатостойкий и

глиноземистый цементы), введению активных минеральных добавок, содержащих активный кремнезем, связывающий портландит в нерастворимые гидросиликаты кальция.

Важнейшим качественным показателем портландцемента в бетонах и растворах является его прочность. Прочностной характеристикой является **класс прочности** (32,5; 42,5; 52,5), характеризирующий прочность на сжатие в МПа, которую должен иметь портландцемент в 28-суточном возрасте при доверительной вероятности 95% и испытании образцов, изготовленных и твердевших в определенных стандартных условиях.

При определении класса прочности портландцемента образцы-балочки изготавливаются размером 40×40×160 мм на стандартном полифракционном песке при водоцементном отношении равном 0,5. Соотношение между портландцементом и песком принимается 1:3 (по массе).

Требования к физико-механическим показателям общестроительных цементов на основе портландцементного клинкера представлены в табл. 3.2.

По **вещественному составу** общестроительные цементы подразделяются на шесть типов (по ГОСТ 31108):

- **ЦЕМ 0** – бездобавочный портландцемент;
- **ЦЕМ I** – портландцемент;
- **ЦЕМ II** – портландцемент с минеральными добавками;
- **ЦЕМ III** – шлакопортландцемент;
- **ЦЕМ IV** – пуццолановый цемент;
- **ЦЕМ V** – композиционный цемент.

По содержанию клинкера и добавок цементы типов ЦЕМ II, ЦЕМ IV, ЦЕМ V делятся на подтипы А и В (за исключением ПЦ типа ЦЕМ II с добавкой микрокремнезема), а шлакопортландцемент (тип ЦЕМ III) – на подтипы А, В и С.

Таблица 3.2

Физико-механические показатели общестроительных цементов

Класс, подкласс прочности	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте				Начало схватывания, мин, не ранее	Равномерность изменения объема (расширение), мм, не более
	2 суток, не менее	7 суток, не менее	28 суток			
			не менее	не более		
32,5М	-	12	32,5	52,5	75	10
32,5Н	-	16				
32,5Б	10	-				
42,5М	-	16	42,5	62,5	60	
42,5Н	10	-				
42,5Б	20	-				
52,5М	10	-	52,5	-	45	
52,5Н	20	-				
52,5Б	30	-				

Примечание: Н, Б, М – нормальнотвердеющий, быстротвердеющий, медленнотвердеющий цемент, соответственно.

Примеры условных обозначений общестроительных цементов:

1. Портландцемент без вспомогательных компонентов и минеральных добавок типа ЦЕМ 0, класса прочности 52,5, нормальнотвердеющий: **бездобавочный портландцемент ЦЕМ 0 52,5Н ГОСТ 31108**.

2. Портландцемент типа ЦЕМ I, класса прочности 42,5, быстротвердеющий: **портландцемент ЦЕМ I 42,5Б ГОСТ 31108**.

3. Портландцемент типа ЦЕМ II, подтипа В со шлаком (Ш) от 21 до 35 %, класса прочности 32,5, нормальнотвердеющий: **портландцемент со шлаком ЦЕМ Н/В-Ш 32,5Н ГОСТ 31108**.

4. Портландцемент типа ЦЕМ II, подтипа А с известняком (И) от 6 до 20 %, класса прочности 32,5, нормальнотвердеющий: **портландцемент с известняком ЦЕМ П/А-И 32,5Н ГОСТ 31108**.

5. Композиционный портландцемент типа ЦЕМ II, подтипа В с суммарным содержанием доменного гранулированного шлака (Ш), золы-уноса (З) и известняка (И) от 21 до 35 %, класса прочности 32,5, быстротвердеющий: **композиционный портландцемент ЦЕМ Н/В-К(Ш-З-И) 32,5Б ГОСТ 31108**.

6. Шлакопортландцемент типа ЦЕМ III, подтипа А с содержанием доменного гранулированного шлака от 36 до 65 %, класса прочности 42,5, нормальнотвердеющий: **шлакопортландцемент ЦЕМ III/А 42,5Н ГОСТ 31108**.

7. Шлакопортландцемент типа ЦЕМ III, подтипа С с содержанием доменного гранулированного шлака от 81 до 95 %, класса прочности 32,5, медленнотвердеющий: **шлакопортландцемент ЦЕМ III/О 32,5М ГОСТ 31108**.

8. Пуццолановый цемент типа ЦЕМ IV, подтипа А с суммарным содержанием пуццоланы (П), золы-уноса (З) и микрокремнезема (Мк) от 11 до 35 %, класса прочности 32,5, нормальнотвердеющий: **пуццолановый цемент ЦЕМ IV/А (П-З-Мк) 32,5Н ГОСТ 31108**.

9. Композиционный цемент типа ЦЕМ V, подтипа А с содержанием доменного гранулированного шлака (Ш) от 18 до 30 % и золы-уноса (З) от 18 до 30 %, класса прочности 32,5, медленнотвердеющий: **композиционный цемент ЦЕМ У/А(Ш-З) 32,5М ГОСТ 31108**.

Требования к химическим показателям общестроительных цементов приведены в табл. 3.3.

Удельная эффективная активность естественных радионуклидов $А_{эфф}$ в общестроительных цементах должна быть не более 370 Бк/кг, а в материалах для изготовления цементов – не более 740 Бк/кг.

Общестроительные цементы применяются при возведении монолитных железобетонных конструкций (ЖБК) практически любого назначения, для производства сборных ЖБК и изделий, для изготовления строительных растворов, сухих строительных смесей, специальных цементов и ряда других строительных материалов.

Таблица 3.3

Химические показатели общестроительных цементов

В процентах от массы цемента

Наименование показателя	Тип цемента	Класс прочности	Значение
Потери массы при прокаливании, не более	ЦЕМ 0	Все классы	3
	ЦЕМ I ЦЕМ III		5
Нерастворимый остаток, не более	ЦЕМ 0	Все классы	3
	ЦЕМ I ЦЕМ III		5
Содержание SO_3, не более	ЦЕМ 0 ЦЕМ I ЦЕМ II ЦЕМ IV ЦЕМ V	32,5Н 32,5Б 42,5Н	3,5
		42,5Б 52,5Н 52,5Б	4
	ЦЕМ III	Все классы	
Содержание MgO, не более	Все типы	Все классы	5
Содержание хлорид-иона Cl^-, не более	Все типы	Все классы	0,1

3.4 Специальные цементы

Быстротвердеющий портландцемент (БТПЦ) отличается быстрым ростом прочности в первые дни твердения. В трехсуточном возрасте он имеет прочность на сжатие не ниже 25-28 МПа.

В составе БТПЦ преобладают активные минералы: трехкальциевый силикат C_3S – 50-55 % и трехкальциевый алюминат C_3A – 5-10 %.

Тонкость помола у БТПЦ выше, чем у обычного портландцемента (удельная поверхность до 500 м²/кг), поэтому при хранении он, адсорбируя влагу из воздуха, комкуется и быстро теряет активность. БТПЦ применяется для бетонов сборных конструкций с повышенной отпускной прочностью и монолитных конструкций. Коррозионная стойкость у БТПЦ пониженная, а тепловыделение повышенное.

Пластифицированный портландцемент (ПФПЦ) – гидравлическое вяжущее, получаемое совместным тонким измельчением портландцементного клинкера и гидрофильной поверхностно-активной добавки при обычной дозировке природного гипса.

В качестве поверхностно-активного вещества применяются, например, технические лигносульфонаты, в количестве от 0,15 до 0,25 % от массы ПФПЦ в пересчете на сухое вещество.

По прочностным показателям ПФПЦ не отличается от обычного портландцемента. Главная его особенность заключается в повышении пластичности бетонной смеси. В результате:

- снижается трудоемкость при укладке смеси, ускоряется бетонирование

и повышается качество укладки бетона в сооружениях;

- уменьшается расход портландцемента в бетоне в результате меньшей дозировки портландцемента и воды (цементного теста), повышается прочность и морозостойкость бетона за счет снижения водоцементного отношения при сохранении заданной пластичности смеси.

Применение ПФПЦ обусловливает улучшение некоторых других строительно-технических свойств бетона: в меньшей степени проявляются деформация усадки и способность к трещинообразованию.

Гидрофобный портландцемент (ГФПЦ) – гидравлическое вяжущее, получаемое совместным тонким измельчением портландцементного клинкера и гидрофобизирующих поверхностно-активных добавок (от 0,05 до 0,5 % от массы ГФПЦ) при обычной дозировке $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. В качестве таких добавок используются олеат натрия, стеарат кальция, отходы переработки нефти (мылонафт, асидол), образующие на зернах портландцемента водоотталкивающие пленки.

ГФПЦ отличается от обычного портландцемента пониженной гигроскопичностью при хранении и транспортировании в неблагоприятных условиях, а также способностью придавать растворным и бетонным смесям повышенную подвижность и удобоукладываемость, а затвердевшим растворам и бетонам – повышенную морозостойкость и водонепроницаемость.

Сульфатостойкий портландцемент (ССПЦ) предназначен для изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций, обладающих повышенной коррозионной стойкостью при воздействии сред, агрессивных по содержанию сульфатов.

По вещественному составу ССПЦ подразделяется на типы (табл. 3.4):

- **ЦЕМ I СС** – сульфатостойкий портландцемент;
- **ЦЕМ II/А СС** и **ЦЕМ II/В СС** – сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками;
- **ЦЕМ III/А СС** – сульфатостойкий шлакопортландцемент.

Таблица 3.4

Вещественный состав сульфатостойкого портландцемента

Наименование портландцемента	Тип портландцемента	Класс и подкласс прочности	Минеральные добавки
Сульфатостойкий портландцемент	ЦЕМ I СС	32,5Н; 32,5Б; 42,5Н; 42,5Б	Не допускаются
Сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками	ЦЕМ II/А-Ш СС ЦЕМ II/В-Ш СС	32,5Н; 32,5Б; 42,5Н	Доменный гранулированный шлак
	ЦЕМ II/А-П СС		Пуццолана
	ЦЕМ II/А-К (Ш-П) СС ЦЕМ II/А-К (Ш-П, МК) СС		Смесь шлака с пуццоланой или микрокремнеземом
Сульфатостойкий шлакопортландцемент	ЦЕМ III/А СС	32,5Н; 32,5Б; 42,5Н	Доменный гранулированный шлак

Клинкер, применяемый при производстве ССПЦ, по химическому и минералогическому составу должен соответствовать требованиям, приведенным в приложении 1. Значения прочности на сжатие ССПЦ представлены в табл. 3.5.

При использовании ССПЦ уменьшается возможность образования в цементном камне гидросульфоалюмината кальция и тем самым повышается стойкость бетона к сульфатной коррозии.

Таблица 3.5

Прочность на сжатие сульфатостойкого портландцемента

Класс и подкласс прочности	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте			
	2 суток, не менее	7 суток, не менее	28 суток	
			не менее	не более
22,5Н	-	11	22,5	42,5
32,5Н	-	16	32,5	52,5
32,5Б	10	-		
42,5Н	10	-	42,5	62,5
42,5Б	20	-		
52,5Н	20	-	52,5	-
52,5Б	30	-		

Белый портландцемент (БПЦ) – продукт тонкого измельчения маложелезистого клинкера с необходимым количеством природного гипса, активной или инертной минеральных добавок, предназначенный для отделочных работ.

Клинкер получается в результате обжига до спекания (или плавления) маложелезистой сырьевой смеси надлежащего состава, обеспечивающего преобладание в нем силикатов кальция.

БПЦ можно выпускать со стандартизованными поверхностно-активными пластифицирующими и гидрофобизирующими добавками (в количестве не более 0,5 % от массы БПЦ), не снижающими белизну.

По **степени белизны БПЦ** подразделяется на три сорта: I, II, III.

Данный показатель определяется по коэффициенту отражения в % абсолютной шкалы, который должен быть для первого сорта БПЦ не менее 80, для второго – 75 и третьего – 68.

Технология производства БПЦ характеризуется следующими отличительными особенностями: исходные сырьевые компоненты должны содержать минимальное количество красящих оксидов железа, марганца, титана и др. Нужно исключить загрязнение сырья, полуфабриката, готовой продукции на всех технологических операциях. Клинкер обжигается на беззольном топливе.

Несмотря на указанные меры, по выходе из печи он все же имеет зеленоватый оттенок. Поэтому, чтобы придать ему высокую степень белизны, его после обжига подвергают специальной обработке –отбеливанию, например, в слабовосстановительной бескислородной газовой, в которой при небольшой концентрации оксида углерода, благодаря разности парциальных давлений

кислорода, происходит диссоциация оксида железа до Fe_3O_4 и частичное восстановление оксида марганца. В результате клинкер приобретает высокую степень белизны.

Необходимый для отбеливания слабовосстановительный газ заданного состава (содержание кислорода менее 0,2 % и оксида углерода более 5 %) получают путем сжигания генераторного газа в специальной камере сжигания, откуда он подается в герметически закрытый с выгрузочного конца отбеливающий холодильник. Клинкер из обреза печи непосредственно поступает в отбеливающий холодильник.

Сырьевые материалы для производства БПЦ – известняки и глинисто-песчаные породы – должны быть с крайне ограниченным содержанием красящих оксидов. Известняки по этому показателю подразделяются на два класса – А и Б.

Максимальное допустимое содержание в известняке оксида железа 0,15 % для класса А и 0,25 % для класса Б. Соответственно содержание оксидов марганца в расчете на MnO (II) – 0,015 % и 0,03 %.

Требования к химическому составу глинисто-песчаного сырья для БПЦ представлены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Химический состав глинисто-песчаного сырья для белого портландцемента

Материал	Допустимое содержание оксидов, %, не более				
	Fe_2O_3	TiO_2	MnO	SiO_2	Al_2O_3
Каолин-сырец	1	0,8	-	72	-
Обогащенный каолин	1,5	1	-	-	-
Песчано-глинистые отходы (шликер)	1	0,8	-	60-72	-
Полукислые глины	1,2	1	-	65-80	25
Кварцевые пески	0,2	-	-	96	-

Цветной портландцемент (ЦПЦ) – гидравлическое вяжущее вещество, получаемое путем совместного тонкого измельчения белого или цветного цементного портландцементного клинкера, активной минеральной добавки (АМД), природного гипса и пигмента.

ЦПЦ должен содержать не менее 80 % клинкера, не более 6 % АМД и 15 % минерального синтетического или природного пигмента, пигментного сырья.

Органического пигмента должно быть не больше 0,5 % от массы клинкера. В ЦПЦ можно вводить также пластифицирующие или гидрофобизирующие добавки в количестве до 0,3 % от массы ЦПЦ в пересчете на сухое вещество.

Пигменты и пигментное сырье должны обладать щелочестойкостью, светостойкостью и не содержать вредных для прочности и морозостойкости цементного камня примесей.

При измельчении клинкера одновременно можно применять не более двух пигментов.

В ЦПЦ, предназначенный для покрасок, следует вводить стеарат кальция не более 1 % или хлорид кальция не более 2 % от массы ЦПЦ.

Существуют утвержденный эталон, а также специальная шкала на ЦПЦ следующих цветов: светло-желтый, желто-золотистый, оранжевый, светло-розовый, розовый, красный, светло- и темно-коричневые, зеленый, голубой и черный.

Окраска природных минералов объясняется в большинстве случаев присутствием в составе минерала элементов красителей, называемых **хромофорами**.

Имеются минералы, окраска которых не связана с их химическим составом и обусловлена содержанием в виде изоморфной примеси иона-хромофора. Хромофорами являются Fe, Ca, Ni, Mn, Cr, Ti, Cu и др.

Первое место среди хромофоров занимает железо Fe^{3+} в виде оксида. Оно придает ЦПЦ интенсивный цвет – красный, бурый, желтый; ион Fe^{2+} дает зеленоватые и голубоватые цвета. Окраска хрома обусловлена присутствием преимущественно трехвалентного Cr^{3+}. В зависимости от особенностей кристаллической структуры минерала трехвалентный хром может придавать ЦПЦ изменчивый цвет от красного до изумрудно-зеленого.

Минеральные синтетические и природные пигменты, пигментное сырье, за исключением марганцовых и хромистых, являются преимущественно железооксидными. Большинство органических пигментов не обладает щелочестойкостью. Исключение составляют голубой и зеленый фталоцианиновые красители, характеризующиеся высокой стойкостью к щелочам, кислотам и атмосферным реагентам. Они обладают сильной красящей способностью, позволяющей получать ЦПЦ чистого и яркого цвета.

Напрягающие цементы (НЦ) – специальные цементы, получаемые тонким совместным измельчением портландцементного клинкера, расширяющихся добавок и природного гипса, предназначенные для бетонов сборных и монолитных конструкций, строительных растворов, сухих ремонтных смесей и обеспечивающие их расширение, предварительное напряжение (самонапряжение) в процессе твердения, повышение трещиностойкости, водонепроницаемости, морозостойкости и долговечности.

Самонапряжение – значение предварительного напряжения цементного камня, создаваемого в результате расширения при твердении в условиях ограничения деформаций.

Расширение – увеличение линейных размеров цементного камня при твердении без упругого ограничения деформаций.

В зависимости от значения самонапряжения НЦ подразделяются на четыре типа:

- **цементы с низкой энергией самонапряжения** (менее 0,7 МПа);
- **цементы с малой энергией самонапряжения** (0,7-2 МПа);
- **цементы со средней энергией самонапряжения** (2-3 МПа);
- **цементы с высокой энергией самонапряжения** (более 3 МПа).

В зависимости от прочности на сжатие НЦ делятся на классы прочности

32,5 и 42,5, подклассы прочности – нормальнотвердеющие Н и быстротвердеющие Б.

Расширяющиеся добавки (глиноземистый шлак, сульфатированный клинкер), допускаемые к применению в количестве свыше 6 % от массы НЦ за вычетом массы природного гипса, а также массы специальных добавок, относятся к основным компонентам НЦ.

Вспомогательными компонентами вещественного состава напрягающих цементов являются минеральные добавки, содержание которых в НЦ не превышает 5 % от суммарной массы основных и вспомогательных компонентов.

Цементы для транспортного строительства изготавливаются на основе портландцементного клинкера нормированного состава и применяются для производства бетонов дорожных и аэродромных покрытий, мостовых конструкций, железобетонных изделий, в том числе железобетонных труб, шпал, опор линий электропередачи, бордюрного камня и др., а также для бетона дорожных оснований и укрепления грунтов.

Таблица 3.7

Типы и классы прочности цементов для транспортного строительства

Назначение	Обозначение	Тип	Класс прочности
Для бетона дорожных и аэродромных покрытий	ДП	ЦЕМ I, ЦЕМ II/А-Ш	32,5Н; 32,5Б; 42,5Н;42,5Б; 52,5Н; 52,5Б
Для бетона дорожных оснований	ДО	ЦЕМ II/А-Ш, ЦЕМ II/В-Ш, ЦЕМ III/А, ЦЕМ V/А	32,5Н; 32,5Б; 42,5Н
Для железобетонных изделий и мостовых конструкций	ЖИ	ЦЕМ I, ЦЕМ II/А-Ш	32,5Н; 32,5Б; 42,5Н;42,5Б; 52,5Н; 52,5Б
Для укрепления грунтов	УГ	-	22,5Н; 32,5Н

По назначению данные цементы подразделяются на:

- цемент для бетонов дорожных и аэродромных покрытий;

- цемент для бетонов дорожных оснований;

- цемент для изготовления железобетонных изделий и мостовых конструкций;

- цемент для укрепления грунтов (табл. 3.7).

Минералогический состав клинкера, используемого для изготовления цемента для бетона дорожных и аэродромных покрытий, мостовых конструкций и железобетонных изделий, используемых в транспортном строительстве, должен соответствовать приведенному в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Минералогический состав портландцементного клинкера для изготовления цементов ДП и ЖИ

Клинкерный минерал	Содержание клинкерного минерала, % от массы клинкера, применяемого для изготовления цемента	
	для бетона дорожных и аэродромных покрытий (ДП)	для железобетонных изделий и мостовых конструкций (ЖИ)
C_3A, не более	7	7
($C_3A + C_4AF$), не более	24	-
C_3S, не менее	55	55

Для изготовления цемента для бетона дорожных оснований и укрепления грунтов применяется портландцементный клинкер, соответствующий требованиям ГОСТ 31108.

Глиноземистые и высокоглиноземистые цементы предназначены для изготовления быстротвердеющих и жаростойких бетонов и строительных растворов, получаются тонким измельчением глиноземистого (высокоглиноземистого) клинкера, состоящего преимущественно из моноалюмината кальция ($CaO \cdot Al_2O_3$).

В зависимости от содержания в цементе оксида алюминия данные цементы подразделяются на следующие виды:

- цемент глиноземистый (ГЦ) (Al_2O_3 – не менее 35 % по массе);

- цемент высокоглиноземистый (ВГЦ) (Al_2O_3 – не менее 60-80 %);

- особочистый высокоглиноземистый цемент (ОВГЦ).

В зависимости от прочности (3 суток твердения) цементы делятся на следующие классы прочности: ГЦ – 40, 50 и 60; ВГЦ – 25, 35; ОВГЦ – 25.

Сырьем для ГЦ, ВГЦ, ОВГЦ служат бокситы и чистые известняки.

Бокситы – горная порода, состоящая из гидратов глинозема ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$) и примесей (в основном Fe_2O_3, SiO_2, CaO и др.).

Производство ГЦ, ВГЦ, ОВГЦ более энергоемко, чем производство портландцемента. Клинкер получается плавлением в электрических, доменных печах (при 1500-1600 °С) или спеканием (при 1200-1300 °С). Помол клинкера затруднен из-за его высокой твердости.

Глиноземистые и высокоглиноземистые цементы целесообразно использовать при аварийных и срочных работах, при зимних работах и в тех случаях, когда от бетона требуется высокая водостойкость и водонепроницаемость. Кроме того, они являются компонентом многих расширяющихся цементов.

Специальная область применения ГЦ, ВГЦ, ОВГЦ – жаростойкие бетоны. Объясняется это тем, что продуктах твердения этих цементов нет $Ca(OH)_2$. Опасность присутствия гидроксида кальция заключается в том, что при нагреве он переходит в CaO, который при любом контакте с водой гасится, разрушая при этом бетон.

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой неорганические вяжущие вещества?
2. Назовите группы неорганических вяжущих веществ в зависимости от условий твердения и сохранения прочности.
3. Дайте определение гипсовых вяжущим веществам. Какова их область применения?
4. На какие виды подразделяются гипсовые вяжущие вещества в зависимости от температуры термической обработки сырья?
5. В чем отличие α- и β-модификаций строительного гипса? Представьте реакцию их гидратации.
6. Перечислите нормируемые показатели качества гипсовых вяжущих веществ.
7. Как различаются гипсовые вяжущие вещества по степени помола и срокам схватывания?
8. Назовите марки по прочности гипсовых вяжущих веществ.
9. В чем причина низкой водостойкости гипсовых вяжущих веществ? Какими способами можно ее повысить?
10. Что такое строительная воздушная известь? Где она применяется?
11. Из каких основных операций состоит технологический процесс производства строительной воздушной извести?
12. Охарактеризуйте физико-химические процессы, происходящие при обжиге кальциево-магниевого карбонатного сырья в шахтной печи.
13. В чем отличие извести-кипелки от извести-пушонки? Представьте реакцию гашения комовой извести.
14. Какими процессами обусловлено твердение строительной воздушной извести?
15. Назовите сорта строительной воздушной извести. Как она различается по содержанию активного оксида магния, времени и температуре гашения?
16. Что представляют собой цементы? Какова их классификация?
17. Как подразделяются общестроительные цементы по вещественному составу?
18. Дайте определение портландцементу. Назовите химический и минералогический составы портландцементного клинкера.
19. Перечислите способы производства портландцемента.
20. Из каких периодов состоит процесс твердения портландцемента?
21. Назовите продукты гидратации клинкерных минералов портландцемента. Какую роль они играют во формировании структуры и свойств цементного камня?
22. Охарактеризуйте свойства портландцемента в состояниях порошка, теста, камня.
23. Какова область применения портландцемента?
24. Приведите примеры условных обозначений общестроительных цементов.
25. Дайте характеристику специальным цементам.

ГЛАВА 4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

Органические вяжущие вещества – высокомолекулярные природные или синтетические вещества, способные:

- приобретать жидко-вязкую консистенцию при нагревании или при действии растворителей или же имеющие эту консистенцию в исходном состоянии;
- самопроизвольно или под действием определенных факторов (температуры, веществ-отвердителей и др.) переходить в твердое состояние с течением времени.

В зависимости от происхождения, химического и вещественного состава ОВВ делятся на следующие группы:

- черные вяжущие (битумы, битумные эмульсии);
- природные смолы, клеи и полимеры;
- синтетические полимеры.

Природные высокомолекулярные вещества применяются как в их естественном состоянии, так и после химической модификации, придающей им необходимые свойства. Например, целлюлоза используется в виде эфиров (нитроцеллюлоза, метилцеллюлоза и т.п.). Битумы также часто подвергаются модификации.

Самая обширная группа органических вяжущих веществ – **синтетические полимеры**. Они получаются из низкомолекулярных продуктов (**мономеров**) полимеризацией и поликонденсацией.

Полимеризацией называется реакция соединения мономеров между собою без образования побочных продуктов. Мономерами, которые вступают в реакцию полимеризации, наиболее часто бывают соединения с кратными связями (двойными, тройными) или циклические. В первом случае полимеризация происходит вследствие раскрытия кратной связи под влиянием энергетического воздействия, во втором – в результате размыкания циклов.

Поликонденсация – реакция образования полимеров, которое сопровождается выделением низкомолекулярных веществ (воды, аммиака, хлорида водорода и т.п.). При этом масса полимера, которую получают, в отличие от полимеризации меньше массы исходных веществ, а его элементарный состав не совпадает с элементарным составом соединений, которые вступают в реакцию.

Специфическая группа полимеров – **эластомеры** (каучуки и каучукоподобные полимеры), обладающие высокоэластичными свойствами – способностью к большим упругим деформациям.

В зависимости от отношения к нагреванию и растворителям ОВВ подразделяются на термопластичные и термореактивные.

Термопластичными называются вещества, которые при нагревании переходят из твердого состояния в жидкое (плавятся), а при охлаждении вновь затвердевают.

Термопластичность объясняется линейным строением молекул и

невысоким межмолекулярным взаимодействием. По этой же причине большинство термопластов способно растворяться в соответствующих растворителях. К **термопластам** относятся битумы, смолы, полиэтилен, поливинилхлорид, полистирол и др.

Термореактивными являются вещества, у которых переход из жидкого состояния в твердое происходит необратимо. При этом у них меняется молекулярная структура: линейные молекулы соединяются в пространственные сетки – гигантские макромолекулы. Такое необратимое твердение (отверждение, сшивка, вулканизация) происходит не только при нагреве, но и под действием веществ-отвердителей и других факторов. Отвержденные термореактивные полимеры, как правило, более теплостойки, чем термопластичные.

Термореактивные вяжущие поступают на строительство часто в виде вязких жидкостей, называемых не совсем правильно «смолами». В химической технологии такие продукты частичной полимеризации (с молекулярной массой менее 1000), имеющие линейное строение молекул и способные к дальнейшему укрупнению и образованию пространственных молекул, называются **олигомерами**.

К термореактивным органическим вяжущим веществам относятся, например, эпоксидные и полиэфирные олигомеры, олифы, каучуки в смеси с вулканизаторами и др.

Органические вяжущие вещества существенно отличаются от неорганических. Адгезионные свойства у них значительно выше, чем минеральных, прочность на сжатие у них сопоставима, а при изгибе и растяжении во много раз выше. У термопластичных вяжущих прочность быстро падает при повышении температуры из-за размягчения полимера.

Органические вяжущие вещества характеризуются низкой термостойкостью. В зависимости от состава и строения температура их размягчения составляет 80-250 °С. Все органические вяжущие – горючие вещества. Большинство из них водо- и химически стойки, хорошо противостоят действию кислот, щелочей и солевых растворов.

Органические вяжущие вещества используются в строительстве для получения клеев, мастик, лакокрасочных материалов, полимерных и полимерцементных растворов и бетонов. Большая же часть синтетических полимеров применяется при производстве пластмасс, в состав которых, как правило, входят наполнители и другие компоненты, придающие пластмассам специальные свойства.

Высокая стоимость полимерных вяжущих выдвигает на первый план при их использовании задачу снижения **полимероемкости**, то есть получения требуемого результата при минимальном расходе полимера. Поэтому полимерные вяжущие применяются в основном для получения тонких облицовочных изделий (плиток, пленок, погонажных изделий), окрасочных и клеящих составов, гидроизоляционных и защитных химически стойких покрытий, а также для изготовления газонаполненных пластмасс – теплоизоляционных материалов с плотностью 10-50 кг/м^3.

4.1 Битумы и битумные эмульсии

Битумы – твердые, вязкопластичные или жидкие (при температуре 20-25 °С) вещества коллоидно-дисперсного строения черного или темно-коричневого цвета, представляющие собой сложную смесь высокомолекулярных углеводородов и их неметаллических производных.

В их состав наряду с углеродом и водородом входят кислород, сера, азот, а также ряд металлов (железо, марганец, никель, ванадий и др.).

Элементный химический состав битумов представлен содержанием (%): углерода (С) от 80 до 87; водорода (Н) от 10 до 12; кислорода (О) от 5 до 10; серы (S) от 2 до 5; азота (N) до 3.

Свойства битумов (твердость, термостойкость, эластичность, морозостойкость, пожаробезопасность, старение, адгезия и др.) зависят от их группового состава, то есть содержания отдельных групп углеводородов: масел, смол, асфальтенов, карбенов и карбоидов, асфальтогеновых кислот и их ангидридов, парафинов.

Групповой состав битумов представлен содержанием (%): масел от 40 до 60; смол от 20 до 40; асфальтенов от 10 до 25; карбенов и карбоидов от 1 до 3; асфальтогеновых кислот и их ангидридов до 1; парафинов до 5.

Масла – вещества светло-желтого цвета плотностью менее 1000 кг/м^3, молекулярной массой от 300 до 600, состоящие из смеси метановых (C_nH_{2n+2}), нафтеновых (C_nH_{2n}) и ароматических (C_nH_{2n-6}) полициклических углеводородов. Увеличение содержания масел снижает твердость и термостойкость битумов.

Смолы – легкоплавкие пластичные вещества темно-коричневого цвета плотностью около 1000 кг/м^3, молекулярной массой от 600 до 1000. По химическому составу относятся к гетероциклическим ароматическим высокомолекулярным соединениям, в состав которых наряду с углеродом входят и атомы кислорода, серы, азота. От содержания смол зависят эластичность битумов.

Асфальтены – твердые вещества плотностью более 1000 кг/м^3, молекулярной массой от 1000 до 5000. Кроме углерода и водорода, содержат кислород и серу. С увеличением количества асфальтенов повышается твердость и термостойкость битумов.

Карбены и карбоиды – черные твердые вещества, содержащиеся в основном в крекинговых битумах. Они повышают твердость, термостойкость и морозостойкость битумов.

Асфальтогеновые кислоты и их ангидриды – густые маслянистые вещества коричневого цвета плотностью более 1000 кг/м^3. Они повышают адгезию (сцепление) битумов с минеральными материалами в структуре асфальтобетона.

Парафины – твердые органические соединения светлого цвета общей формулой C_nH_{2n+2} (с n более 16), которые в расплавленном состоянии обладают

низкой вязкостью и снижают (при содержании более 5 %) эластичность и морозостойкость битумов.

В зависимости от твердости при температуре 20-25 °С битумы бывают твердыми, вязкими и жидкими.

Твердые битумы находятся в вязкоупругом состоянии и приобретают текучесть при нагревании до 180-200 °С.

Вязкие битумы имеют вязкопластичное состояние и становятся текучими при нагревании до 120-160 °С.

Жидкие битумы являются текучими за счет содержания в них летучих разжижающих добавок.

По происхождению битумы делятся на природные и искусственные.

Природные битумы представляют собой черную или темно-коричневую термопластичную массу, состоящую из сложной смеси углеводородов нефтяного происхождения и некоторого количества растительных и минеральных примесей. По твердости они могут быть твердыми (асфальтиты), вязкими (асфальты) и жидкими (мальты).

Природные битумы образовались из нефти в верхних слоях земной коры в результате медленного испарения из нее легких и средних фракций, природной деасфальтизации нефти, а также процессов взаимодействия ее компонентов с кислородом или серой.

В чистом виде они встречаются редко, гораздо чаще содержатся в составе битумсодержащих (битуминозных) горных пород, представленных песками, песчаниками, известняками, доломитами, пропитанными природным битумным веществом.

Природные битумы не получили широкого распространения в дорожном строительстве, что связано с недостаточной экономичностью разработок залежей битуминозных пород, а также неоднородностью их состава.

Искусственные битумы – органические вяжущие вещества, получаемые в результате переработки нефти и нефтепродуктов (нефтяные битумы) или горючих сланцев (сланцевые битумы).

По способу получения нефтяные битумы подразделяют на остаточные, окисленные, крекинговые, компаундированные (смешанные) и битумы деасфальтизации.

Остаточные битумы – разновидность нефтяных битумов, получаемых при прямой атмосферно-вакуумной перегонке нефти, при которой после отбора из нее топливных и масляных фракций (бензина, керосина, солярового и других масел) остается гудрон.

Окисленные битумы – разновидность нефтяных битумов, получаемых окислением воздухом нефтяных остатков (гудронов, полугудронов, мазутов, крекинг-остатков и др.) в специальных установках периодического или непрерывного действия. При этом периодическое окисление проводится в окислительных кубах, непрерывное – в трубчатых или колонных окислительных установках.

Крекинговые битумы – разновидность нефтяных битумов, получаемых

при окислении воздухом крекинг-остатков (фракций с температурой кипения более 350 °С), которые образуются во время крекинга нефти.

Крекинг – высокотемпературная переработка нефти под давлением с целью получения продуктов меньшей молекулярной массы (моторного топлива, смазочных масел и т.п.), а также сырья для химической и нефтехимической промышленности.

Компаундированные битумы – разновидность нефтяных битумов, получаемых смешиванием нефтепродуктов различной вязкости (остаточных и окисленных битумов, битумов деасфальтизации, экстрактов селективной очистки масел или гудрона) и введением поверхностно-активных веществ и других добавок при необходимости, что позволяет получить битумы различного структурно-реологического типа и химического состава с регулируемыми физико-химическими свойствами.

Битумы деасфальтизации – разновидность нефтяных битумов, получаемых извлечением смолисто-асфальтовых веществ из гудрона при помощи растворителей, чаще всего сжиженного пропана.

По своему строению битум – коллоидная система, в которой диспергированы асфальтены (дисперсная фаза), а дисперсионной средой являются смолы и масла (рис. 4.1).

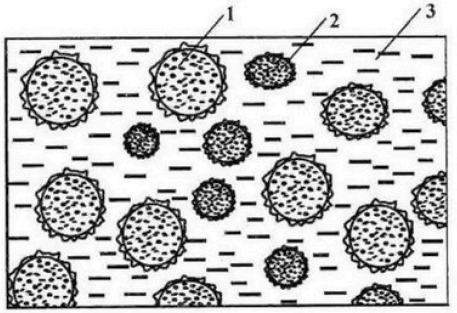


Рис. 4.1. Коллоидно-дисперсное строение битума:
1 – дисперсная фаза (асфальтены); 2 – стабилизаторы дисперсии (смолы);
3 – дисперсионная среда (масла)

Асфальтены в виде частиц размером 18-20 мкм являются ядрами, каждое из которых окружено оболочкой убывающей плотности от тяжелых смол к маслам.

Свойства битума как коллоидной системы определяются соотношением входящих в него составных частей: масел, смол и асфальтенов. Повышение содержания асфальтенов ведет за собой возрастание твердости, температуры размягчения и хрупкости битума. Наоборот, масла, частично растворяющие смолы, делают битум мягким и легкоплавким. Увеличение содержания смол повышает растяжимость битума, то есть он становится более эластичным.

По классификации А.С. Колбановской различаются битумы I, II и III структурных типов, которые можно отождествлять с коллоидными системами:

- «**гель**» – коагуляционная сетка-каркас из асфальтенов, находящаяся в слабо структурированной смолами дисперсионной среде, состоящей из смеси парафино-нафтеновых и ароматических углеводородов. Асфальтены, составляющие сетку, взаимодействуют друг с другом через тонкие прослойки дисперсионной среды. На внешней лиофильной поверхности асфальтенов адсорбируются смолы, обладающие в тонком пленочном слое повышенными механическими свойствами;

- «**золь**» – предельно стабилизированная разбавленная суспензия асфальтенов в сильно структурированной смолами дисперсионной среде. Асфальтены, несвязанные и невзаимодействующие друг с другом, адсорбируют смолы, переводя их в пленочное состояние, обладающее повышенной вязкостью и прочностью. При одной и той же степени структурирования среды смолами для получения структуры с данной вязкостью необходимое количество асфальтенов зависит от их лиофильности, уменьшаясь с увеличением последней;

- «**золь-гель**» – система, в которой отдельные агрегаты или вторичные структурные образования асфальтенов находятся в дисперсионной среде, структурированной смолами в значительно большей степени, чем среда типа «гель», но в меньшей степени, чем среда типа «золь».

Битум I типа («гель») имеет низкую устойчивость против действия окислительных факторов в процессе технологической переработки при производстве асфальтобетона.

К преимуществам **битума II типа («золь»)** относятся высокая когезия и деформационная устойчивость в упруго-вязком состоянии, повышенная устойчивость против воздействия окислительных факторов, приводящих к старению. Недостатками являются отсутствие эластического и упруго-пластического состояний, низкая теплостойкость и плохая водостойкость.

Структура **битума III типа («золь-гель»)** считается оптимальной для дорожного строительства. Этот тип битумов не имеет явно выраженных недостатков I и II типов.

По назначению нефтяные битумы разделяют на:

- **дорожные** (вязкие и жидкие);
- **строительные** (для строительных работ в различных отраслях народного хозяйства);
- **кровельные** (пропиточные и покровные, применяемые для производства кровельных материалов);
- **изоляционные** (для изоляции трубопроводов от грунтовой коррозии);
- **специальные** (для лакокрасочной, шинной, электротехнической и других отраслях промышленности).

В дорожном строительстве, помимо вязких и жидких нефтяных дорожных битумов, могут применяться **сланцевые битумы** – органические вяжущие вещества, получаемые из остатков от переработки горючих сланцев

(осадочной органогенной горной породы, содержащей кероген) и используемые для приготовления эмульсий, паст и композиционных битумсодержащих вяжущих.

Вязкие дорожные нефтяные битумы применяют в качестве вяжущих веществ для асфальтобетона при строительстве и ремонте дорожных и аэродромных покрытий и оснований, а также в качестве основы для производства модифицированных битумов и битумных эмульсий.

Вязкие дорожные нефтяные битумы изготавливают окислением продуктов прямой перегонки нефти и селективного разделения нефтепродуктов, а также компаундированием указанных окисленных и не окисленных продуктов или в виде остатка прямой перегонки нефти.

Свойства вязких дорожных нефтяных битумов характеризуются основными и дополнительными показателями (по ГОСТ 33133). К основным показателям относятся: глубина проникания иглы при 25 °С; температура размягчения; растяжимость при 0 °С; температура хрупкости; температура вспышки; изменение массы и температуры размягчения после старения.

Глубина проникания иглы (пенетрация) – показатель, характеризующий твердость (вязкость) битумов и выраженный как расстояние в десятых долях миллиметра (0,1 мм), на которое стандартная вертикально расположенная пенетрационная игла проникает в пробу битума при заданной нагрузке, температуре и времени погружения.

Пенетрация зависит от температуры, группового состава (процентного содержания масел и асфальтенов), структуры битума и является основным физико-химическим показателем, по которому устанавливается марка вязких дорожных нефтяных битумов.

В зависимости от значения глубины проникания иглы при 25 °С вязкие дорожные нефтяные битумы подразделяются на шесть марок: БНД 130/200, БНД 100/130, БНД 70/100, БНД 50/70, БНД 35/50, БНД 20/35, где буквы означают битум нефтяной дорожный, а числа – допустимые пределы отклонений глубины проникания иглы.

Глубина проникания иглы при 25 °С вязкого дорожного нефтяного битума марки БНД 130/200 составляет 131-200 (0,1 мм), БНД 100/130 – 101-130 (0,1 мм), БНД 70/100 – 71-100 (0,1 мм), БНД 50/70 – 51-70 (0,1 мм), БНД 35/50 – 36-50 (0,1 мм), БНД 20/35 – 20-35 (0,1 мм).

Температура размягчения – показатель термостойкости битума, выраженный как температура в °С, при которой образец битума переходит в вязко-текучее состояние и под действием веса стального шарика касается нижней пластины аппарата.

Термостойкость зависит от группового состава (процентного содержания масел, асфальтенов, карбенов и карбоидов) битума и увеличивается с повышением его твердости.

Температура размягчения вязкого дорожного нефтяного битума марки БНД 130/200 составляет не ниже 42 °С, БНД 100/130 – 45 °С, БНД 70/100 – 47 °С, БНД 50/70 – 51 °С, БНД 35/50 – 53 °С, БНД 20/35 – 55 °С.

Растяжимость (дуктильность) – показатель эластичности битума, характеризующий расстояние в сантиметрах (см), при котором растягиваемый с постоянной скоростью образец битума вытягивается в нить до разрыва.

Растяжимость зависит от группового состава и температуры битума. С понижением содержания смол и температуры эластичность битума уменьшается.

Для однородных битумов (по источнику сырья и технологии переработки) существует определенная зависимость между твердостью и эластичностью: чем больше вязкость (меньше глубина проникания пенетрационной иглы), тем меньше растяжимость.

Растяжимость при 0 °С вязкого дорожного нефтяного битума марки БНД 130/200 составляет не менее 6 см, БНД 100/130 – 4 см, БНД 70/100 – 3,7 см, БНД 50/70 – 3,5 см, БНД 35/50 и БНД 20/35 – не определяется.

С эластичностью битума тесно связаны деформативные свойства асфальтобетона. Чем больше растяжимость битума, тем выше трещиностойкость асфальтобетона на его основе.

Температура хрупкости – показатель морозостойкости битума, выраженный как температура в градусах Цельсия (°С), при которой образец битума разрушается при изгибе под действием кратковременно приложенной нагрузки.

Температура хрупкости зависит от твердости битума и свойств исходного сырья. Для битумов, полученных из однородного сырья, увеличение вязкости приводит к повышению температуры хрупкости и наоборот.

Температура хрупкости вязкого дорожного нефтяного битума марки БНД 130/200 составляет не выше минус 21 °С, БНД 100/130 – минус 20 °С, БНД 70/100 – минус 18 °С, БНД 50/70 – минус 16 °С, БНД 35/50 – минус 14 °С, БНД 20/35 – минус 11 °С.

Большое влияние на температуру хрупкости оказывает содержание в битуме парафинов, повышенное количество которых (более 5 %) снижает морозостойкость битума.

Хрупкость битума и асфальтобетона на его основе отрицательно сказываются на эксплуатационных свойствах дорожных и аэродромных покрытий и оснований: повышается склонность к образованию трещин, к деформациям и разрушениям.

Температура вспышки – показатель пожаробезопасности битума и выраженный как минимальная температура в °С с поправкой на нормальное атмосферное давление, при которой пары битума, нагреваемого в определенных условиях, образуют с окружающим воздухом смесь, воспламеняемую при поднесении к ней открытого пламени.

Битум является горючим веществом, поэтому его хранят в закрытых складах или под навесом таким образом, чтобы на него не попадали прямые солнечные лучи. При работе с битумом, особенно при разогреве, во избежание вспышки, следует соблюдать требования пожарной безопасности.

Температура вспышки вязкого дорожного нефтяного битума марки БНД

130/200 составляет не ниже 220 °С, остальных марок – 230 °С.

Старение – изменение физико-химических показателей, в частности массы и температуры размягчения, битумов в процессе воздействия потока воздуха и температуры на образец битума в виде тонкой движущейся пленки.

Изменение массы после старения вязкого дорожного нефтяного битума марки БНД 130/200 составляет не более 0,8 %, БНД 100/130 – 0,7 %, БНД 70/100 и БНД 50/70 – 0,6 %, БНД 35/50 и БНД 20/35 – 0,5 %.

Изменение температуры размягчения после старения вязкого дорожного нефтяного битума марок БНД 130/200, БНД 100/130, БНД 70/100 и БНД 50/70 составляет не более 7 °С, БНД 35/50 и БНД 20/35 – 6 °С.

Дополнительными показателями свойств вязких дорожных нефтяных битумов являются: динамическая вязкость; изменение динамической вязкости в результате сдвигового воздействия; изменение динамической вязкости после старения; изменение динамической вязкости в результате сдвигового воздействия после старения; растяжимость при 25 °С; максимальное усилие при растяжении при 25 °С; максимальное усилие при растяжении при 0 °С; температура хрупкости после старения; глубина проникания иглы при 0 °С; растворимость; содержание твердых парафинов; индекс пенетрации.

Динамическая вязкость – показатель, характеризующий реологическое свойство битума, рассчитываемый как отношение напряжения сдвига к скорости сдвига.

Максимальное усилие при растяжении – наибольшее усилие, при котором образец битума способен сопротивляться прилагаемому напряжению при растяжении.

Растворимость – способность битума растворяться в органическом растворителе.

Индекс пенетрации – расчетный показатель, характеризующий степень изменения дисперсного состояния битума в зависимости от значений температуры размягчения и глубины проникания иглы при 25 °С.

Индекс пенетрации битума ИП, безразмерная величина, вычисляют до первого десятичного знака по формуле

$$ИП = \frac{30}{1+50A} - 10, \qquad (4.1)$$

где А – коэффициент, который определяется по формуле

$$A = \frac{2{,}9031 - \log П}{Тр - 25} - 10, \qquad (4.2)$$

где П – глубина проникания иглы при 25 °С, 0,1 мм;

$Т_р$ – температура размягчения, °С.

Чем больше индекс пенетрации, тем шире интервал пластичности, тем более качественным является битум для дорожного строительства.

Интервал пластичности битума $T_{пл}$, °С, определяют расчетным путем по формуле

$$T_{пл} = T_р - T_{хр}, \quad (4.3)$$

где $T_р$ – температура размягчения битума, °С;
$T_{хр}$ – температура хрупкости битума, °С.

Интервал пластичности показывает, насколько тепловые свойства битума соответствуют реальным годичным изменениям температуры в данной местности.

Величина интервала пластичности выпускаемых битумов составляет, как правило, не более 60-65 °С, тогда как для предотвращения образования трещин на покрытии в зимнее время и колейности в летнее время интервал пластичности битумов в климатических условиях большинства регионов России должен составлять не менее 70-80 °С.

Увеличение интервала пластичности битумных вяжущих достигается введением в битум модифицирующих добавок полимеров, каучуков, термоэластопластов, резины и др.

Битумы с индексом пенетрации выше минус 1 характеризуются повышенной чувствительностью к изменению температуры. При низких температурах и кратковременных нагрузках от колес автомобильного транспорта они разрушаются, как хрупкий материал. При индексе пенетрации от минус 1 до плюс 1 битумы менее чувствительны к изменению температуры, менее хрупки, так как при низких температурах у них сохраняются вязкопластические свойства. Такие битумы наиболее широко применяются в дорожном строительстве. Битумы с индексом пенетрации более плюс 1 характеризуются высокой теплостойкостью и малой хрупкостью при низких температурах.

Адгезионные свойства битума, влияющие на долговечность битумно-минеральных материалов, характеризуются его **активностью**, то есть способностью к прочному сцеплению с поверхностью минеральных частиц.

Активность битумов зависит от содержания в них поверхностно-активных соединений – асфальтеновых кислот и их ангидридов.

Недостаточная активность битумов в необходимых случаях компенсируется добавками поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые разделяют на катионо- и анионоактивные.

В **катионоактивных ПАВ** (амины и их соли, четырехзамещенные аммониевые основания) углеводородная часть молекул входит в состав катиона, в **анионоактивных ПАВ** (органические кислоты и их производные) – в состав аниона.

Катионоактивные ПАВ обеспечивают повышенное сцепление битумов со всеми горными породами, но особенно эффективны с кислыми, анионоактивные повышают сцепление с карбонатными породами.

Расход катионоактивных ПАВ составляет 0,5-2 % от массы битума, анионоактивных – 3-5 %.

Значительное количество ПАВ входит в состав смол твердых видов топлив. Для улучшения адгезионной способности битумов к ним добавляют 7-12 % смол твердых видов топлив. Некоторые ПАВ повышают стойкость битумов к старению.

Битумы – гидрофобные материалы, несмачиваемые и нерастворимые в воде, инертные к водным растворам минеральных солей и кислот, что позволяет их широко применять для гидроизоляционной и антикоррозионной защиты. Агрессивно влияют на эти материалы щелочные растворы (уже 10 %-ный раствор щелочи вызывает омыление битума) и сильно концентрированные кислоты, обладающие окислительной способностью.

Битумы хорошо растворяются в органических растворителях особенно неполярного типа (дихлорэтан, уайт-спирт, хлороформ и др.).

Увеличение полярности битумов и улучшение адгезионных свойств достигается не только введением ПАВ. С этой целью возможна обработка битумов ультразвуком, приводящая к разрушению асфальтеновых комплексов.

При использовании битумов, обработанных ультразвуком, существенно, увеличивается прочность асфальтобетонов, на 20-30 % возрастает их водоустойчивость.

Для пластификации битума, снижения его температуры хрупкости, расширения интервала пластичности применяют добавки-пластификаторы, в качестве которых используют жидкие фракции нефти или каменноугольной смолы, богатые ароматическими соединениями.

Специальные добавки могут повышать или уменьшать вязкость битума. В первом случае применяют природные тугоплавкие битумы-асфальтиты, резиновую крошку, во втором разжижают битумы нефтью, продуктами углехимической промышленности.

Улучшение деформативных свойств битумов, расширение интервала их пластичности и улучшение адгезионных свойств обеспечивается также окислением нефтяного сырья в присутствии добавок окисленного петролатума, кубовых остатков производства синтетических жирных кислот и некоторых других веществ, содержащих тяжелые углеводороды. С этой же целью применяют добавки синтетических смол и каучуков в количестве 2-5 % по массе.

Для предотвращения старения, сохранения прочности, эластичности, высокой адгезии битума в присутствии воды предложено обрабатывать битум SO_3, нефтяными сульфонатами, карбоксилатами, $AlCl_3$, гидрофобными ПАВ.

Повышение стабильности окисленных битумов к термо- и фотохимическому окислению обеспечивается введением в них 2-5 % печной сажи.

Устойчивость битумов к воздействию микроорганизмов обеспечивается введением добавки 1-3 % перманганата калия, 3-5 % сульфата и нафтената меди, солей или оксида цинка, пентахлорфенилового эфира и др.

Дорожная битумная эмульсия (ЭБД) – однородная жидкость, получаемая на битумном вяжущем (без добавления полимерных добавок) путем его диспергирования в водном растворе эмульгатора.

Водный раствор эмульгатора (водная фаза) представляет собой раствор, содержащий в себе воду, эмульгатор, кислоту или щелочь и другие компоненты, необходимые для приготовления ЭБД, а **эмульгатор** – поверхностно-активное вещество (ПАВ), активизирующее процесс диспергирования битумного вяжущего и обеспечивающее устойчивость образующейся эмульсии.

Для производства ЭБД используются следующие материалы: битумные вяжущие; вода; эмульгаторы; адгезионные добавки; стабилизаторы; кислоты или щелочи; латекс; разжижители битумных вяжущих.

Для приготовления ЭБД применяются вязкие дорожные нефтяные битумы и полимерно-битумные вяжущие.

Марка используемых битумных вяжущих должна соответствовать климатическим условиям района применения.

Для производства ЭБД необходимо использовать воду с жесткостью не более 8 мг-экв/л. Вода не должна содержать нерастворенных частиц и осадка.

В качестве эмульгаторов вводятся ПАВ анионного или катионного типа. Эмульгатор должен соответствовать виду, классу и типу приготавливаемой эмульсии и обеспечивать ее необходимые свойства.

Для получения необходимой адгезии битумного вяжущего, содержащегося в эмульсии, к каменным материалам и поверхности дорожного покрытия в их состав при необходимости вводят адгезионные добавки (ПАВ).

Адгезионная добавка должна обеспечивать получение эмульсии с характеристиками, соответствующими нормативным требованиям. Для достижения необходимой адгезии используют адгезионные добавки, которые вводят в битумное вяжущее или водную фазу.

Стабилизаторы, обычно растворы солей, служат для стабилизации эмульсий, замедления их седиментации, продления срока хранения и увеличения транспортной стабильности. Наиболее широко применяемым стабилизатором катионных эмульсий является хлористый кальций.

Дозировка хлористого кальция в пересчете на сухое вещество не должна превышать 0,1 % от массы готовой эмульсии.

Для производства катионных ЭБД целесообразно использовать соляную и ортофосфорную кислоты.

Кислоты не должны содержать ингибиторов коррозии, используемых для защиты металлов в металлургии.

Для приготовления анионных ЭБД применяются гидроксид натрия, жидкое стекло, триполифосфат натрия или гидрат оксида калия.

Для снижения вязкости используемого битумного вяжущего и улучшения его дисперсности дисперсионной среде при выпуске эмульсий допускается использовать разжижитель (флюксант). Он должен быть легколетучим и не оказывающим отрицательного влияния на свойства остаточного вяжущего.

В качестве разжижителя целесообразно использовать уайт-спирит, керосин или другие совместимые с битумом вещества.

В зависимости от скорости распада при смешивании с минеральными материалами ЭБД подразделяются на три класса: **быстрораспадающиеся**, **среднераспадающиеся**, **медленнораспадающиеся**.

В зависимости от химической природы эмульгатора ЭБД бывают двух видов: **катионные** и **анионные**.

В зависимости от вида, класса и модификации ЭБД различаются на марки, представленные в приложении 2.

Свойства эмульсий битумных дорожных характеризуются следующими основными показателями: индексом распада; содержанием вяжущего с эмульгатором; условной вязкостью; остатком на сите № 014; устойчивость к расслоению; адгезией с минеральными материалами; устойчивостью при транспортировании.

4.2 Термопластичные полимеры

Термопластичными полимерами (ТПП) называются вещества, способные многократно размягчаться при нагревании и отвердевать при охлаждении. Эти и многие другие свойства ТПП объясняются линейным строением их макромолекул. При нагревании взаимодействие между молекулами ослабевает, и они могут сдвигаться одна относительно другой, полимер размягчается, превращаясь при дальнейшем нагревании в вязкую жидкость. На этом свойстве базируются различные способы формования изделий из ТПП, а также соединение их сваркой.

Однако на практике не все ТПП так просто можно перевести в вязкотекучее состояние, так как температура начала термического разложения некоторых полимеров ниже температуры их перехода в вязкотекучую фазу (в частности, для поливинилхлорида, фторпластов и др.). В таком случае используются различные технологические приемы, снижающие температуру текучести (например, вводятся пластификаторы) или задерживающие термодеструкцию (добавлением стабилизаторов, переработкой в среде инертного газа).

Линейным строением молекул объясняется также способность ТПП не только набухать, но и хорошо растворяться в правильно подобранных растворителях. Тип растворителя зависит от химической природы полимера.

Растворы полимеров, даже очень небольшой концентрации (2-5 %), отличаются довольно высокой вязкостью, причиной этого являются большие размеры полимерных молекул, по сравнению с молекулами обычных низкомолекулярных веществ. После испарения растворителя полимер вновь переходит в твердое состояние. На этом основано использование растворов ТПП в качестве лаков, красок, клеев и вяжущего компонента в мастиках и полимерных растворах.

К недостаткам ТПП относятся низкая теплостойкость (обычно не выше

80-120 °С), низкая поверхностная твердость, хрупкость при пониженных температурах и текучесть при высоких, склонность к старению под действием солнечных лучей и кислорода воздуха.

Главнейшие термопластичные полимеры, применяемые в строительстве – поливинилхлорид, полистирол, полиэтилен и полипропилен, а также поливинилацетат, полиакрилаты и др.

Кроме ТПП, получаемых из одного мономера, синтезируются **сополимеры** – продукты, получаемые совместной полимеризацией (сополимеризацией) двух и более мономеров. В таком случае образуются материалы с новым комплексом свойств. Так, винилацетат полимеризуется совместно с этиленом для получения сополимера более прочного и водостойкого, чем поливинилацетат, но сохраняющего его высокие адгезионные свойства. Широкий спектр сополимеров выпускается на базе акриловых мономеров.

Полиэтилен (ПЭ) $[-CH_2-CH_2-]_n$ – продукт полимеризации этилена. ПЭ роговидный, жирный на ощупь, просвечивающийся материал, легко режется ножом; при поджигании горит и одновременно плавится с характерным запахом горящего парафина. При комнатной температуре ПЭ практически не растворяется ни в одном из растворителей, но набухает в бензоле и хлорированных углеводородах; при температуре выше 70-80 °С он растворяется в указанных растворителях.

ПЭ обладает высокой химической стойкостью, биологически инертен. Под влиянием солнечного излучения ПЭ стареет, теряя эксплуатационные свойства.

При нагреве до 50-60 °С ПЭ снижает свои прочностные показатели, но при этом сохраняет эластичность до минус 60-70 °С. ПЭ хорошо сваривается и легко перерабатывается в изделия. Из него изготавливают пленки (прозрачные и непрозрачные), трубы, электроизоляцию.

Вспененный полиэтилен (рис. 4.2) в виде листов и труб используется для целей теплоизоляции и герметизирующих прокладок.

К недостаткам ПЭ относятся низкая теплостойкость и твердость, горючесть, быстрое старение под действием солнечного света. Защищают полиэтилен от старения, вводя в него наполнители (сажу, алюминиевую пудру) или специальные стабилизаторы.

Для повышения теплостойкости ПЭ производят его молекулярную сшивку. Изделия из сшитого полиэтилена могут работать при температуре до 95 °С и выдерживать кратковременный нагрев до 125-130 °С. При этом ПЭ теряет способность свариваться. Сшитый ПЭ используется при производстве труб и электрических кабелей.

Полипропилен (ПП) $[-CH_2-CH(CH_2)-]_n$ – полимер, по составу близкий к полиэтилену. При синтезе ПП образуется несколько различных по строению полимеров: изотактический, атактический.



Рис. 4.2. Вспененный полиэтилен

В основном применяется **изотактический полипропилен (ИПП)**. Он отнимается от полиэтилена большей твердостью, прочностью и теплостойкостью (температура размягчения около 170 °С), переход в хрупкое состояние происходит уже при минус 10-20 °С. Плотность ИПП составляет 920-930 кг/м^3; прочность при растяжении – 25-30 МПа; относительное удлинение при разрыве – 200-800 %. ИПП плохо проводит тепло (коэффициент теплопроводности 0,15 Вт/(м·°С).

Максимальная температура эксплуатации для изделий из ИПП находится в интервале 120-140 °С, но изделия, находящиеся в нагруженном состоянии, например трубы горячего водоснабжения (рис. 4.3), не рекомендуется использовать при температуре выше 75 °С.

Применяется ИПП практически для тех же целей, что и полиэтилен, но изделия из него более жесткие и формоустойчивые.

Атактический полипропилен (АПП) получается при синтезе полипропилена как примесь, но легко отделяется от изотактического ПП экстракцией (растворением в углеводородных растворителях). АПП –мягкий эластичный полимер плотностью 840-845 кг/м^3 с температурой размягчения 30-80 °С. Используется АПП как модификатор битумных композиций в кровельных материалах.



Рис. 4.3. Изотактический полипропилен

Полистирол (ПС) [– CH_2 – $CH(C_6H_5)$ –]$_n$ – прозрачный полимер плотностью 1050-1080 кг/м^3; при комнатной температуре жесткий и хрупкий, а при нагревании до 80-100 °С размягчающийся. Прочность при растяжении при 20 °С составляет 35-50 МПа.

ПС хорошо растворяется в ароматических углеводородах (влияние бензольного кольца, входящего в состав молекул полистирола), сложных эфирах и хлорированных углеводородах. ПС горюч и хрупок. Для снижения хрупкости ПС синтезируется с другими мономерами или совмещается с каучуками (ударопрочный полистирол).

В строительстве ПС применяется для изготовления теплоизоляционного материала – **вспененного полистирола** (пенополистирола) плотностью в интервале 15-50 кг/м^3, облицовочных плиток и мелкой фурнитуры (рис. 4.4).

Поливинилхлорид (ПВХ) [– CH_2 – CHCl –]$_n$ — самый распространенный в строительстве полимер – представляет собой твердый материал без запаха и вкуса, бесцветный или желтоватый (при переработке в результате термодеструкции может приобрести светло-коричневый цвет).

Плотность ПВХ составляет 1400 кг/м^3, предел прочности при растяжении – 40-60 МПа, коэффициент теплопроводности – 0,22 Вт/(м·°С).

Температура текучести ПВХ равна 180-200 °С, но уже при нагревании выше 160 °С он начинает разлагаться с выделением HCl. Это обстоятельство затрудняет переработку ПВХ в изделия.

Поливинилхлорид хорошо совмещается с пластификаторами. Это облегчает переработку и позволяет получать изделия с самыми разнообразными свойствами: жесткие листы и трубы, эластичные погонажные изделия, мягкие пленки. ПВХ хорошо сваривается; склеивается он только некоторыми видами клеев, например, перхлорвиниловыми. Положительное качество ПВХ – высокие химическая стойкость, диэлектрические показатели и низкая горючесть.

В строительстве ПВХ используется для изготовления материалов для полов (различные виды линолеума, плитки), труб, погонажных изделий

(поручни, плинтусы сайдинг и т.п.) и отделочных декоративных пленок и пенопластов (рис. 4.5).

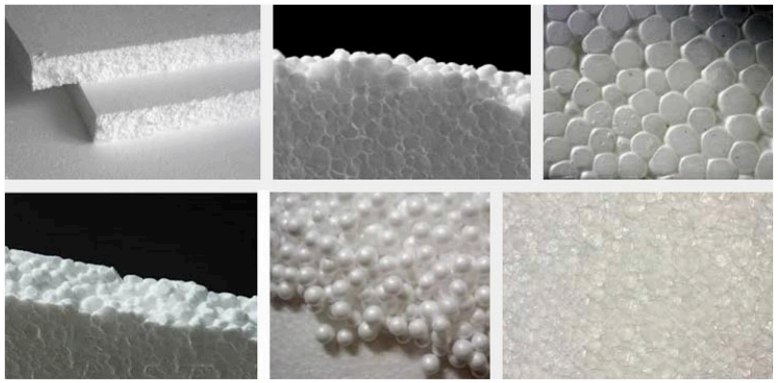


Рис. 4.4. Вспененный полистирол

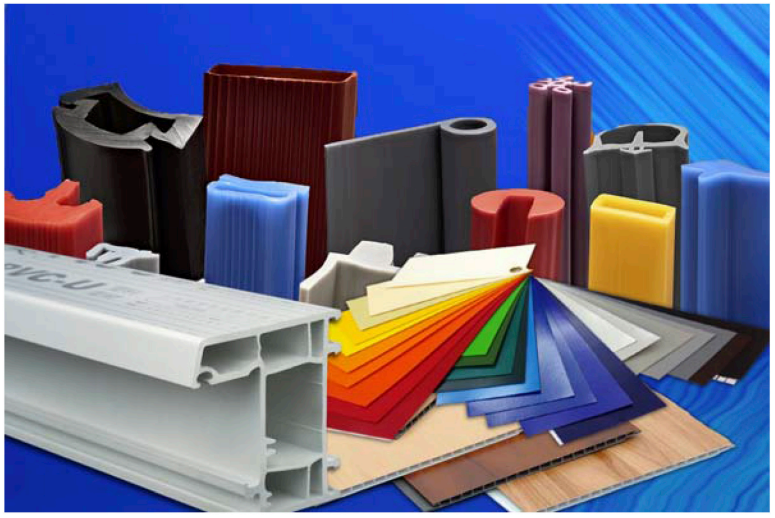


Рис. 4.5. Поливинилхлорид

Поликарбонаты (ПК) – сравнительно новая для строительства группа полимеров – сложных эфиров угольной кислоты. Наибольший интерес представляют линейные ароматические поликарбонаты с молекулярной массой (30-35) · 10^3, отличающиеся высокой температурой плавления (250 ± 20) °С и относящиеся к самозатухающим веществам.

Они отличаются высокими физико-механическими показателями, мало изменяющимися в интервале температур от минус 100 до плюс 150 °С.



Рис. 4.6. Пустотелый поликарбонат

Плотность ПК составляет 1200 кг/м^3; прочность при растяжении – 55-75 МПа при относительном удлинении 50-100 %; у них высокая ударная прочность и твердость.

Перерабатываются ПК в изделия экструзией, литьем под давлением горячим прессованием и др. Они легко обрабатываются механическими методами, свариваются горячим воздухом и склеиваются с помощью растворителей. Поликарбонаты оптически прозрачны, устойчивы к атмосферным воздействиям, в том числе к ультрафиолетовому излучению.

Их широко применяют для электротехнических изделий (розеток, вилок, телефонных аппаратов и т.п.). В строительстве листовой поликарбонат и пустотелые (сотовые) панели используются для светопрозрачных ограждений (рис. 4.6).

Поливинилацетат (ПВА) [– CH_2 – $CH(CH_2COO)$ –]$_n$ – прозрачный бесцветный жесткий при комнатной температуре полимер плотностью, равной 1190 кг/м^3. ПВА растворим в кетонах (ацетоне), сложных эфирах, хлорированных и ароматических углеводородах, набухает в воде. ПВА не стоек к действию кислот и щелочей; при нагреве выше 130-150 °С он разлагается с выделением уксусной кислоты. Положительное свойство ПВА – высокая адгезия к каменным материалам, стеклу, древесине.

В строительстве ПВА применяется в виде **поливинилацетатной дисперсии (ПВАД)** – сметанообразной массы белого или светло-кремового цвета, хорошо смешивающейся с водой. ПВАД получается полимеризацией жидкого винилацетата, эмульсированного в виде частиц размером до 5 мкм в воде. Для стабилизации эмульсии винилацетата используется поливиниловый спирт (ПВС). При полимеризации капельки винилацетата превращаются в

твердые частицы поливинилацетата, таким образом образуется ПВАД, стабилизатором которой служит тот же ПВС. Содержание полимера в дисперсии около 50 %.

Поливинилацетатная дисперсия выпускается средней (С), низкой (Н) и высокой (В) вязкости в пластифицированном и непластифицированном виде. Пластификатором служит дибутилфталат, содержание которого указывается в марке индексом. В грубодисперсной ПВАД, обычно применяемой в строительстве, содержание пластификатора (% от массы полимера): 5-10 (индекс 4), 10-15 (индекс 7) и 30-35 (индекс 20).

По внешнему виду пластифицированная и непластифицированная ПВАД почти не отличаются одна от другой. Поэтому, чтобы определить вид дисперсии, небольшое ее количество наносится на чистое стекло и выдерживается при комнатной температуре до высыхания. У пластифицированной дисперсии образуется прозрачная эластичная пленка, у непластифицированной – пленка ломкая, снимается со стекла с трудом, крошится.

Пластифицированная ПВАД является неморозостойкой и при замораживании необратимо разрушается с осаждением полимера. Поэтому в зимнее время пластификатор поставляют в отдельной упаковке. Для этого пластификатор перемешивается с дисперсией с последующей выдержкой 3-4 ч для его проникновения в частицы полимера.

Непластифицированная ПВАД выдерживает не менее четырех циклов замораживания-оттаивания при температуре до минус 40 °С. Срок ее хранения при температуре 5-20 °С составляет 6 месяцев.

Поливинилацетат широко применяется в строительстве. На его основе изготавливаются клеи, вододисперсионные краски, моющиеся обои.

ПВАД используются для устройства наливных мастичных полов и для модификации цементных растворов (полимерцементные растворы и бетоны). Дисперсией, разбавленной до 5-10 %-ной концентрации, грунтуются бетонные поверхности перед приклеиванием облицовки на полимерных мастиках и перед нанесением полимерцементных растворов.

Недостатком материалов на основе дисперсий поливинилацетата является чувствительность к воде. Они набухают, и на них могут появиться высолы. Это объясняется наличием в дисперсиях заметного количества водорастворимого стабилизатора и способностью самого полимера набухать в воде. Так как дисперсия имеет слабокислую реакцию (pH 4,5-6), при нанесении на металлические изделия возможна коррозия металла.

4.3 Термореактивные полимеры

Молекулы **термореактивных полимеров (ТРП)** до их отверждения имеют линейное строение, такое же, как молекулы термопластичных полимеров (ТПП), но размер молекул ТРП в этом состоянии существенно меньше, чем у ТПП.

В отличие от ТПП, у которых молекулы химически инертны и не способны соединяться друг с другом, молекулы ТРП (олигомеров) химически активны. Они либо содержат двойные (ненасыщенные) связи, либо химически активные группы. Поэтому при определенных условиях (при нагревании, облучении или добавлении веществ-отвердителей) молекулы ТРП соединяются друг с другом, образуя сплошную пространственную сетку – макромолекулу.

После отверждения свойства ТРП существенно изменяются: они перестают размягчаться при нагревании, не растворяются, а только набухают в растворителях, становятся более прочными, твердыми и термостойкими.

К ТРП, используемым в строительстве, относятся: карбамидные, полиэфирные, эпоксидные и полиуретановые полимеры.

Карбамидные полимеры (КП) – продукты поликонденсации мочевины и ее производных с формальдегидом (мочевиноформальдегидные и меламиноформальдегидные полимеры). Особенностью КП является их бесцветность, светостойкость, отсутствие запаха и меньшая токсичность в исходном состоянии.

Мочевиноформальдегидные полимеры (МЧФП) – один из самых дешевых карбамидных полимеров, что объясняется доступностью сырья и простотой синтеза. В строительстве МЧФП широко применяются в качестве полимерного связующего. Для этих целей используются, главным образом, водные растворы мочевиноформальдегидных смол. Отверждение смол производится кислотными отвердителями при обычной температуре или при нагревании.

Недостаток МЧФП – большая усадка при отверждении и недостаточная водостойкость отвержденного полимера. Для получения более водостойких материалов МЧФП модифицируются высшими спиртами, получая этерифицированные полимеры, растворимые в спиртах.

В основном МЧФП применяются для склеивания древесины и изготовления древесно-стружечных плит.

Меламиноформальдегидные полимеры (ММФП) более дорогие, так как для их синтеза используется менее доступное сырье – меламин. В отвержденном состоянии они имеют лучшие, чем МЧФП, свойства. Они характеризуются высокой твердостью и водостойкостью.

Из ММФП получаются клеи для склеивания древесины, бумаги. Пример материала, получаемого на таких клеях, – декоративный бумажно-слоистый пластик, имеющий гладкую твердую поверхность, с довольно высокой термостойкостью, и ламинированные покрытия для полов (ламинат).

Ненасыщенные полиэфиры – олигомерные продукты в виде вязких жидкостей, способные переходить в твердое состояние при введении отвердителей. В строительстве применяются смолы двух типов: полиэфирмалеинаты и полиэфиракрилаты.

Полиэфирмалеинаты (ПЭМ) представляют собой раствор ненасыщенного, то есть способного к сшивке, полиэфира в стироле. При введении в ПЭМ инициирующей пары: перекисный инициатор (гипериз) и

ускоритель разложения перекиси (нафтенаткобальт) – перекись, распадаясь, инициирует химическую активность стирола, и он сшивает молекулы полиэфира по ненасыщенным связям в пространственную сетку. При этом жидкая масса превращается в твердый прочный материал. Обычно принимается соотношение ПЭМ, инициатора и ускорителя (100 : 3 : 8). При 20 °С процесс отверждения длится 20-60 ч, но ПЭМ теряет текучесть через 0,5-2 ч.

Полиэфиракрилаты (ПЭА) – олигомеры, не содержащие стирола и отверждаемые перекисными отвердителями в сочетании с ускорителями.

В отвержденном виде ПЭА характеризуются высокой прочностью и химической стойкостью. Для снижения хрупкости и получения высокопрочных конструкционных материалов их армируют стекловолокном. Такие материалы называются **стеклопластиками**.

В строительных отделочных работах полиэфирные полимеры используются для устройства наливных бесшовных полов, изготовления шпатлевок, лакирования древесины.

Эпоксидные полимеры (ЭП) – большая группа олигомерных продуктов, получивших свое название по эпоксидным группам, входящим в молекулу олигомеров.

По этим эпоксидным группам линейные молекулы ЭП можно сшивать отвердителями, главным образом, аминами.

Характерные особенности ЭП – высокая адгезия к большинству материалов, универсальная химическая стойкость, водостойкость и водонепроницаемость. Прочность отвержденных ЭП – до 100-150 МПа.

В строительстве чаще применяют ЭП в виде смол, представляющих собой жидкости желтого цвета различной вязкости. При введении отвердителя уже при нормальной температуре смола через 2-4 ч желатинизируется, а через 8-12 ч необратимо затвердевает. Нагревание ускоряет твердение и увеличивает степень отверждения. Положительное качество **эпоксидных смол** – малая усадка при твердении, что повышает прочность и трещиностойкость изделий на их основе. Для повышения эластичности в смолы можно вводить пластификаторы.

Эпоксидные полимеры используются для устройства наливных бесшовных полов высокой износо- и химической стойкости, изготовления конструкционных строительных клеев (для склеивания и ремонта бетонных и металлических конструкций), а также в красках и шпатлевочных составах, в герметиках и полимерных растворах специального назначения.

Полиуретановые полимеры (ПУП) в главной цепи макромолекулы содержат уретановую группу [– NH – (C–O) – O –]. ПУП отличаются высокой прочностью, очень высокой стойкостью к истиранию и действию ультрафиолетового излучения. Поэтому они применяются при изготовлении шин, конвейерных лент, подошв для обуви, покрытий полов общественных, промышленных зданий и спортивных площадок.

Большое количество ПУП используется для получения эластичных (поролона) и жестких строительных пенопластов.

Одна из интереснейших разновидностей ПУП – пенополиуретаны, наносимые напылением: жидкую полиуретановую смолу разбрызгивают из распылителя на изолируемую поверхность, на которой в течение 10-30 с полиуретан вспенивается и отвердевает. Отвердителем одного из типов полиуретановых смол служит вода, поэтому лаками на этих смолах можно покрывать и влажные поверхности. Полиуретанами также покрывают металлочерепицу для обеспечения высокой долговечности.

4.4 Природные полимеры

К **природным полимерам**, применяемым в строительстве, относятся смолы, ненасыщенные (высыхающие) масла, целлюлоза и некоторые белковые вещества (казеин, глютин и др.).

Для получения вяжущих веществ природные полимеры, как правило, модифицируют с целью улучшения их свойств.

Природные смолы – продукты растительного происхождения, выделяющиеся на поверхности коры деревьев самопроизвольно или в результате ее разрушения. Смолы состоят из смеси органических высоко- и низкомолекулярных веществ. Различаются молодые (свежие) смолы, собираемые непосредственно с деревьев (например, живица – сосновая или еловая смола), и ископаемые смолы – продукты жизнедеятельности давно погибших деревьев (янтарь, копалы).

Молодые смолы содержат много низкомолекулярных летучих веществ, ископаемые смолы – твердые, хрупкие материалы.

В строительстве чаще применяются продукты, получаемые при переработке смолы хвойных деревьев, – канифоль и скипидар.

Сосновая канифоль – хрупкая стекловидная масса желтого цвета, состоящая в основном из смоляных кислот (до 90 %). При температуре 55-70 °С она размягчается, а при 120 °С – превращается в жидкость.

Канифоль хорошо растворяется во многих органических растворителях: ацетоне, эфире, скипидаре, уайт-спирите и спирте. Растворы канифоли обладают клеящими свойствами.

Применяют канифоль в мастиках, для улучшения их адгезионных свойств. В качестве водоудерживающей и пластифицирующей добавки рекомендуется **камедь** – смола тропической акации (гуммиарабик).

Олифы – пленкообразующие вещества на основе уплотненных растительных масел или жирных алкидных смол, которые используются в качестве пленкообразующего компонента в масляных красках и как вяжущее – пластификатор в мастиках при облицовочных работах.

Целлюлоза (полисахарид) – самый распространенный природный полимер, образующий стенки растительных клеток. В чистом виде в качестве органического вяжущего целлюлозу не применяют. Она практически не растворяется в воде и органических растворителях. Обычно используются простые и сложные эфиры целлюлозы: нитроцеллюлоза, метилцеллюлоза,

карбоксиметилцеллюлоза и др.

Нитроцеллюлоза (НЦ) получается путем обработки целлюлозы азотной кислотой (до содержания азота 10-12 %), образующийся продукт называется коллоксилином. НЦ легко растворяется в ацетоне, этилацетате; хорошо пластифицируется дибутилфталатом, камфарой. НЦ нашла применение в производстве лаков, нитроэмалей, шпатлевок и клеев.

Метилцеллюлоза (МЦ) – метиловый эфир целлюлозы, твердое белое вещество, хорошо растворимое в холодной воде. Растворы МЦ даже при концентрации 0,5-1 % характеризуются высокой вязкостью и отсутствием тиксотропных свойств. При нагревании до 40-50 °С растворы МЦ желатинизируются.

В строительстве МЦ широко используется как загуститель вододисперсионных красок и как регулятор водоудерживающей способности строительных растворов. Растворам МЦ свойственно сильное пенообразование, поэтому их целесообразно применять с пеногасителями.

Карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) – порошкообразный или волокнистый продукт белого цвета, хорошо растворяющийся в воде.

Образующийся с водой вязкий раствор применяется в качестве клея для обоев, а также в цементных смесях для приклеивания плиток. КМЦ биостойкая, не токсичная, стойкая к действию жиров, масел и органических растворителей.

Кроме строительства, КМЦ в больших количествах используют в нефтедобывающей и горнообогатительной промышленности для повышения вязкости воды, в текстильной промышленности (как аппретирующее вещество) и полиграфии.

Контрольные вопросы

1. Что называется органическими вяжущими веществами?
2. Перечислите виды органических вяжущих веществ.
3. В чем различие термопластичных и термореактивных вяжущих?
4. Что такое битумы? Назовите их элементный химический и групповой состав.
5. Какова классификация битумов по происхождению, назначению, твердости?
6. Охарактеризуйте виды нефтяных битумов по способу получения.
7. Что представляют собой вязкие дорожные нефтяные битумы? Как их получают?
8. По каким основным показателям характеризуются свойства вязких битумов?
9. Перечислите дополнительные показатели свойств вязких битумов.
10. Что такое пенетрация битумов? Как она определяется?
11. Перечислите марки вязких битумов по пенетрации.
12. Что называется дорожными битумными эмульсиями?
13. На какие классы подразделяются дорожные битумные эмульсии в

зависимости от скорости распада при смешивании с минеральными материалами?

14. Перечислите виды дорожных битумных эмульсий по химической природе эмульгатора эмульсии.

15. Каковы требования предъявляются к материалам для производства дорожных битумных эмульсий?

16. Назовите область применения катионных и анионных битумных эмульсий.

17. Какие основные показатели свойств дорожных битумных эмульсий вы знаете?

18. Расскажите об основных свойствах термопластичных полимеров.

19. Какие термопластичные полимеры применяются в строительстве?

20. Дайте определения поливинилхлориду, полистиролу, полиэтилену, полипропилену.

21. Что представляет собой поливинилацетатная дисперсия?

22. Какова область применения поливинилацетатной дисперсии?

23. Назовите основные свойства термореактивных полимеров?

24. Охарактеризуйте карбамидные и эпоксидные полимеры.

25. Какие производные целлюлозы применяются в отделочных работах?

ГЛАВА 5. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БЕТОНОВ

5.1 Классификация бетонов

Бетоном называется искусственный камневидный строительный материал, получаемый в результате формования и твердения рационально подобранной и уплотненной бетонной смеси.

Бетоны классифицируются по следующим признакам (ГОСТ 25192): основное назначение; стойкость к коррозии; вид вяжущего вещества и заполнителей; структура, условия твердения, прочность и скорость ее набора; средняя плотность, морозостойкость, водонепроницаемость, истираемость.

В зависимости от **основного назначения** (рис. 5.1) различаются:

- конструкционные бетоны для несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений, определяющими требованиями к качеству которых являются повышенные физико-механические характеристики;

- специальные бетоны, выполняющие теплоизоляционные, декоративные, радиационно-защитные и иные функции.

По стойкости к коррозии бетоны подразделяются на 5 видов, обозначаемых индексами А, Б, В, Г и Д (приложение 3).

По виду вяжущего вещества бетоны бывают:

- цементными (на основе цементов, изготавливаемых с использованием портландцементного, глиноземистого (высокоглиноземистого), сульфоалюминатного (сульфоферритного) клинкеров);

- известковыми (на основе строительной воздушной и гидравлической извести в сочетании с гидравлическими активными и (или) кремнеземистыми компонентами);

- гипсовыми (на основе полуводного гипса или ангидрита, включая гипсоцементно-пуццолановые вяжущие);

- шлаковыми (на основе молотых шлаков и зол с активизаторами твердения – щелочными растворами, известью, цементом или гипсом);

- специальными (бетоны на магнезиальных вяжущих, полимербетоны и др.).

По виду заполнителей различаются бетоны на:

- плотных заполнителях (щебень и гравий из плотных горных пород и промышленных отходов со средней плотностью зерен 2000-3000 кг/м^3, природные пески с истинной плотностью 2000-2800 кг/м^3, пески из отсевов дробления плотных горных пород и др.);

- пористых заполнителях (щебень и песок из пористых горных пород вулканического (пемз, туфов и др.) или осадочного происхождения (известняков-ракушечников, опок и др.), искусственные керамзитовый шунгизитовый, аглопоритовый гравий и др.);

- специальных заполнителях (вспененный гранулированный полистирол, заполнители для жаростойких, химически стойких, декоративных, радиационно-защитных бетонов и др.).

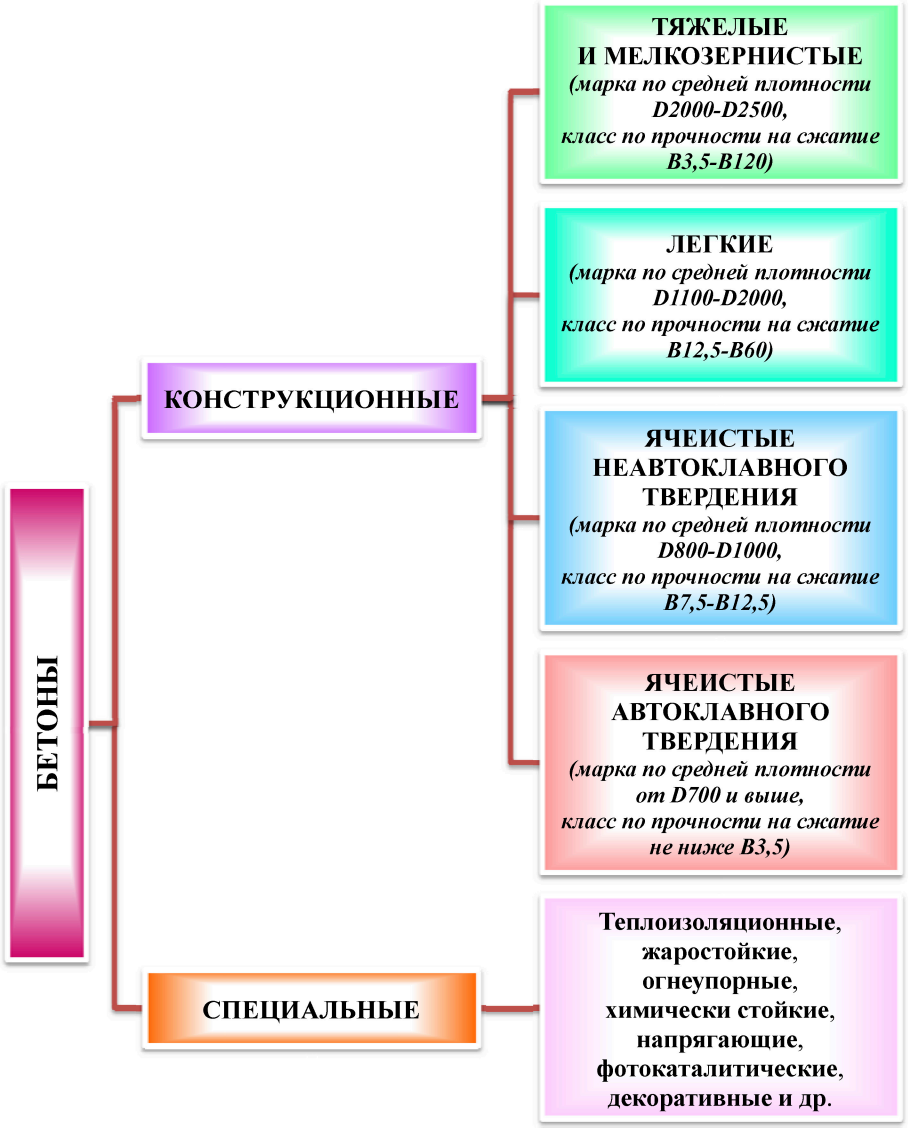


Рис. 5.1. Классификация бетонов по основному назначению

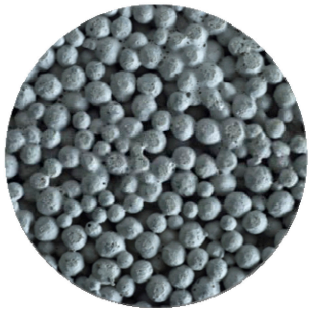
	**БЕТОН ПЛОТНОЙ СТРУКТУРЫ** (пространство между зернами крупного и мелкого заполнителей или только мелкого заполнителя заполнено затвердевшим вяжущим и порами вовлеченного воздуха, в том числе образующихся за счет применения добавок, регулирующих пористость бетонной смеси и бетона)
	**БЕТОН ПОРИЗОВАННОЙ СТРУКТУРЫ** (пространство между зернами крупного заполнителя заполнено затвердевшим поризованным вяжущим)
	**БЕТОН ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ** (затвердевшая смесь вяжущего, кремнеземистого компонента и искусственных равномерно распределенных пор в виде ячеек, образованных газо- и пенообразователями)
	**БЕТОН КРУПНОПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ** (пространство между зернами крупного заполнителя не полностью заполнено мелким заполнителем и затвердевшим вяжущим)

Рис. 5.2. Виды бетонов по структуре

По структуре бетоны подразделяются на плотные, поризованные, ячеистые, крупнопористые (рис. 5.2).

По условиям твердения бетоны классифицируются на твердеющие:

- в естественных (нормальных) условиях (температура (20 ± 2) °С, относительная влажность воздуха (95 ± 5) %);
- в условиях тепловой обработки при атмосферном давлении (температура 80-85 °С для бетонов на основе портландцемента, 90-95 °С – на основе шлакопортландцемента, влажность среды не менее 90-100 %)
- в условиях тепловой обработки при давлении выше атмосферного (автоклавное твердение, давление 0,8-1,5 МПа, температура 175-200 °С, среда насыщенного водяного пара).

По прочности (классу прочности на сжатие B) бетоны бывают высокопрочными (В60 и более) и средней прочности (до В55).

По скорости набора прочности в нормальных условиях твердения бетоны различаются на быстротвердеющие (отношение значений прочности на сжатие в возрасте 2 и 28 суток $R_{сж.}^{2\ сут.}$ / $R_{сж.}^{28\ сут.}$ более 0,4) и медленнотвердеющие ($R_{сж.}^{2\ сут.}$ / $R_{сж.}^{28\ сут.}$ до 0,4 включительно).

По средней плотности (марке по средней плотности D) бетоны подразделяются на особо тяжелые (более D2500), тяжелые (D2000 – D2500), легкие (D800 – D2000) и особо легкие (менее D800).

По морозостойкости (марке по морозостойкости F) различаются бетоны высокой (F400 – F1000), средней (F75 – F300) и низкой (F25 – F50) морозостойкости.

5.2 Вяжущие вещества

В качестве вяжущих веществ для тяжелых, мелкозернистых и легких бетонов применяются:

- общестроительные цементы (ГОСТ 31108);
- сульфатостойкие цементы (ГОСТ 22266).

Для бетонов, подвергаемых тепловой обработке, используются цементы I и II группы эффективности при пропаривании (приложение 4).

В агрессивных условиях эксплуатации изделий и конструкций виды цемента выбираются по данным, указанным в приложении 4.

Для тяжелых бетонов класса по прочности на сжатие В60 и выше необходимо использовать портландцемент без минеральных добавок класса не ниже ЦЕМ I 42,5 с содержанием C_3A не более 8 %.

Минимальный расход цемента для бетонов, эксплуатируемых в неагрессивной среде, в зависимости от вида конструкций, представлен в табл. 5.1, а для изготовления изделий и конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, – в приложении 4.

Рекомендуемые классы цемента для бетонов при твердении в нормальных условиях или при тепловой обработке приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.1

Минимальный расход цемента для тяжелых бетонов, эксплуатируемых в неагрессивной среде

Вид конструкции	Расход цемента вида (типа), кг на 1 м^3		
	ЦЕМ I, ЦЕМ I СС	ЦЕМ II, ЦЕМ II СС	ЦЕМ III АСС, ЦЕМ III, ЦЕМ IV, ЦЕМ V
Неармированные, условия эксплуатации которых исключают замораживание и оттаивание	Не нормируется		
Армированные с ненапрягаемой арматурой	150	170	180
Армированные с предварительно напряженной арматурой	220	240	270

Таблица 5.2

Рекомендуемые классы цемента по прочности на сжатие для тяжелых бетонов

Класс по прочности на сжатие бетона	Класс по прочности на сжатие цемента
B7,5	22,5
B12,5	22,5
B15	22,5
B20	32,5
B22,5	32,5
B25	32,5
B30	42,5
B35	42,5
B40	42,5
B45	52,5
B50	52,5
B55	52,5

Цементы для бетонов гидротехнических сооружений следует выбирать в зависимости от места расположения зоны сооружения и агрессивности среды с учетом требований ГОСТ 31384:

- для бетонов внутренней и подводной зоны сооружения – сульфатостойкие цементы по ГОСТ 22266, цементы типов ЦЕМ I – ЦЕМ V по ГОСТ 31108;
- для бетона наружной зоны и зоны переменного уровня воды – сульфатостойкие цементы типов ЦЕМ I СС, ЦЕМ II/А-Ш СС, ЦЕМ II/В-Ш СС по ГОСТ 22266, цементы типов ЦЕМ I, ЦЕМ II на основе клинкера с содержанием C_3A до 7 %, C_3S до 60 % с минеральной добавкой гранулированного доменного шлака до 15 % по ГОСТ 31108.

Для бетонов массивных сооружений следует применять сульфатостойкий цемент по ГОСТ 22266 на основе клинкера с содержанием C_3S до 60 %, цементы типов ЦЕМ I – ЦЕМ V по ГОСТ 31108 на основе клинкера с

содержанием C_3A до 7 %, C_3S до 60 %.

В качестве вяжущих веществ для бетона покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов следует применять цементы для транспортного строительства по ГОСТ Р 55224 с минимальным расходом не менее 150 кг на 1 м^3.

Вяжущими веществами для бетона транспортных сооружений (мостов, путепроводов, эстакад, труб и др.) служат сульфатостойкий цемент по ГОСТ 22666, цемент по ГОСТ 31108 на основе клинкера с содержанием C_3A до 7 % или цемент для транспортного строительства по ГОСТ Р 55224.

Максимальный расход цемента для бетона мостовых конструкций не должен превышать, кг на 1 м^3: класса В35 – 450; класса В40 – 500; класса В45 – 550.

В качестве вяжущих веществ для изготовления ячеистых бетонов неавтоклавного и автоклавного твердения применяются:

- портландцемент по ГОСТ 31108 без добавок трепела, глиежа, трасов, глинита, опоки, пеплов, содержащий трехкальциевый алюминат (C_3A) не более 8 % по массе, с началом схватывания не ранее 2 ч, концом – не позднее 4 ч;
- кальциевая негашеная известь по ГОСТ 9179, быстро- и среднегасящаяся, имеющая время гашения 5-25 мин и содержащая активные оксиды кальция (CaO) и магния (MgO) не менее 70 %, зерна пережога не более 2 %.

По виду вяжущего вещества гипсобетоны различаются на основе:

- неводостойких гипсовых вяжущих, предназначенные для внутренних помещений с относительной влажностью воздуха до 75 %;
- водостойких гипсовых вяжущих – для помещений с повышенной влажностью воздуха и для наружных строительных работ.

Для приготовления асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов используются вязкие дорожные нефтяные битумы по ГОСТ 22245, жидкие битумы по ГОСТ 11955, а также модифицированные битумные вяжущие.

5.3 Заполнители

Заполнители – природные или искусственные сыпучие материалы определенного зернового состава, которые в рационально составленной смеси с вяжущим веществом и водой образуют бетон. Стоимость заполнителей достигает 30-50 % стоимости бетонных и железобетонных изделий и конструкций. Поэтому изучение, правильный выбор заполнителей, рациональное их производство и применение имеют большое значение.

Основными признаками классификации различных заполнителей для бетона являются: средняя плотность зерен; происхождение; крупность зерен; характер формы зерен.

Таблица 5.3

Классификация заполнителей для бетонов

Происхождение	Наименование	Внешний вид
Плотные заполнители (средняя плотность зерен более 2000 кг/м^3)		
Природные	Щебень из изверженных горных пород	 Гранитный щебень  Габбро-диабазовый щебень  Базальтовый щебень

Продолжение таблицы 5.3

Происхождение	Наименование	Внешний вид
	Щебень из метаморфических горных пород	 Мраморный щебень
Природные	Щебень из осадочных горных пород	 Известняковый щебень
	Гравий из горных пород	
	Щебень из гравия	

Продолжение таблицы 5.3

Происхождение	Наименование	Внешний вид
	Природный песок, обогащенный и фракционированный пески, песок из отсевов дробления плотных горных пород	 Природный кварцевый песок
Природные	Декоративные щебень и песок из плотных горных пород	
Из отходов промышленности	Щебень и песок из плотных шлаков черной и цветной металлургии	 Шлаковый щебень
	Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого плотного бетона и железобетона	 Щебень из дробленого бетона

Продолжение таблицы 5.3

Происхождение	Наименование	Внешний вид
Пористые заполнители (средняя плотность зерен менее 2000 кг/м^3)		
А. Неорганические Природные	Щебень и песок из пористых горных пород вулканического (пемз, шлаков, туфов и др.) и осадочного происхождения (пористых известняков, известняков-ракушечников, опок и др.)	 Пемзовый щебень
Из отходов промышленности	Щебень и песок из пористых шлаков черной и цветной металлургии	 Щебень из пористого шлака
	Щебень и песок из кирпичного боя	 Щебень из кирпичного боя
	Золошлаковые смеси, грубодисперсные золы-уноса	 Золошлаковая смесь

Продолжение таблицы 5.3

Происхождение	Наименование	Внешний вид
Искусственные	Керамзитовые гравий, щебень, песок	 Керамзитовый гравий
Искусственные	Аглопоритовые гравий, щебень, песок	 Аглопоритовый гравий
	Термолитовые гравий, щебень, песок	 Термолитовый гравий
	Вспученные перлитовые песок, щебень	 Вспученный перлитовый щебень

Продолжение таблицы 5.3

Происхождение	Наименование	Внешний вид
	Пористые заполнители на основе зол и шлаков теплоэлектростанций (зольный и шлакозитовый гравий, глинозольные и глиношлаковые гравий и щебень, зольные аглопоритовые гравий и щебень, глинозольный и глиношлаковый песок, зольный аглопоритовый песок)	 Зольный гравий
Искусственные	Щебень из пеностекла	
Б. Органические Отходы лесозаготовок, лесопиления и деревообработки Измельченное растительное сырье	Измельченная древесина (щепа, дробленка, стружка, опилки) хвойных (ель, сосна, пихта) и лиственных (береза, осина, бук, тополь) пород Дробленка из стеблей хлопчатника, рисовой соломы и др.	 Древесная щепа
Специальные заполнители		
Для огнеупорных бетонов	Кремнеземистый, алюмосиликатный, глиноземистый заполнители (кварцитовый, полукислый, шамотный, муллитокремнеземистый, муллитовый, муллитокорундовый, корундовый)	 Корундовый заполнитель

Продолжение таблицы 5.3

Происхождение	Наименование	Внешний вид
Для жаростойких бетонов	Кордиеритовый, кордиеритомуллитовый, муллитокордиеритовый, карборундовый, периклазовый заполнители и др.	 Кордиеритовый заполнитель
Для радиационно-защитных бетонов	Баритовый, магнетитовый, гематитовый, лимонитовый заполнители и др.	 Баритовый заполнитель
Для полистиролбетона	Вспененный гранулированный полистирол	

Заполнители относятся к **плотным** (нерудные строительные материалы, щебень и песок из отходов промышленности), если средняя плотность зерен составляет свыше 2000 кг/м^3 и к **пористым** (пористые заполнители), если плотность зерен – до 2000 кг/м^3.

Заполнители по происхождению подразделяются на **природные** (в том числе из попутно добываемых пород и отходов обогащения), **из отходов промышленности** и **искусственные** (специально приготавливаемые) (табл. 5.3).

Природные заполнители и из отходов промышленности, получаемые без изменения их химического состава и фазового состояния, характеризуются соответственно генезисом и петрографическим наименованием горных пород

или видом отходов.

Искусственные заполнители, получаемые из природного сырья и отходов промышленности путем термической и других видов обработки, характеризуются видом сырья и технологией производства.

По крупности зерен заполнители подразделяются на: **крупные** – с зернами (кусками) свыше 5 мм (щебень, гравий); **мелкие** – с размером зерен до 5 мм (песок).

По характеру формы зерен различаются:

- заполнители угловатой (неправильной) формы, получаемые дроблением горных пород или искусственных материалов (щебень, дробленый песок и др.);
- заполнители округлой формы (гравий, природный песок и др.)

Заполнители являются важной составной частью бетона и обычно занимают до 80 % его объема. Они оказывают значительное влияние на процессы структурообразования, свойства бетонных смесей и бетонов.

Состав бетонной смеси и ее технологические свойства, необходимые для обеспечения удовлетворительного перемешивания, транспортирования, укладки и уплотнения, в значительной мере определяются содержанием и качеством применяемых заполнителей.

При проектировании состава цементной бетонной смеси, как правило, исходят из необходимости получения бетона заданной прочности и консистенции при минимальном расходе цемента. Для бетонов плотной структуры требование минимального расхода цемента обеспечивается максимальным насыщением объема бетона заполнителями.

Прочность бетона зависит от прочности сцепления цементного камня с поверхностью зерен заполнителей.

Щебень в качестве крупного заполнителя лучше гравия, так как имеет более благоприятную для сцепления форму зерен и развитую шероховатую поверхность. Его используют для получения высокопрочных бетонов.

Помимо формы зерен заполнителей на прочность сцепления с ними цементного камня влияет чистота поверхности.

Природные заполнители нередко бывают загрязнены. Например, глинистые примеси, обволакивающие зерна тонкой пленкой, препятствуют сцеплению. Поэтому их следует предварительно промывать. В случае применения непромытых заполнителей целесообразно при приготовлении бетонной смеси в смесителе сначала их перемешать с водой и лишь потом добавить цемент.

Положительное влияние на сцепление оказывает пористость зерен заполнителя. Благодаря отсосу воды пористым заполнителем в бетонной смеси цементное тесто проникает в открытые поры, то есть происходит срастание цементного камня с заполнителем. Кроме того, водопоглощение устраняет опасность образования у поверхности заполнителей водных пленок, снижающих сцепление.

На физико-химические процессы, определяющие прочность сцепления составляющих бетона, влияют химический и минеральный составы

заполнителей.

Обычный бетон и железобетон при известных достоинствах имеют существенный недостаток – конструкции получаются сравнительно тяжелыми.

В изгибаемых железобетонных конструкциях нередко половина несущей способности используется на восприятие собственного веса. Это особенно ощутимо в большепролетных конструкциях и ограничивает возможности применения железобетона.

Использование легких бетонов позволяет снизить массу конструкций на 20-40 %, повысить их полезную несущую способность или сократить расход арматурной стали. Кроме того, достигается большой экономический эффект за счет сокращения затрат на транспорт и монтаж конструкций, а также за счет снижения нагрузки на все нижележащие конструкции.

Снижение средней плотности бетона достигается в основном применением легких пористых заполнителей. Чем легче заполнитель, тем легче бетон.

Однако если требуется получить легкий бетон определенной прочности, необходимо считаться с тем, что чем легче пористый заполнитель, тем меньше его прочность.

При стремлении получить высокопрочный бетон на очень легком и низкопрочном заполнителе приходится ограничивать его расход, увеличивая при этом количество цемента, в этом случае средняя плотность бетона будет больше, чем при применении достаточно прочного пористого заполнителя.

Теплопроводность – одно из важнейших свойств бетона, применяемого в ограждающих конструкциях. Чем легче бетон, тем меньше его теплопроводность, поскольку уменьшение средней плотности бетона связано с повышением пористости, то есть вовлечением в объем бетона воздуха (эффективного теплоизолятора).

Теплопроводность бетона в значительной мере определяется видом используемого заполнителя. Развитие производства пористых заполнителей для легких бетонов сделало возможным массовое применение легкобетонных стеновых панелей наружных стен в жилищном строительстве, теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов различного назначения.

Заполнители в бетоне тормозят развитие пластических деформаций цементного камня и тем в большей степени, чем больше насыщен бетон заполнителем и чем выше модуль упругости заполнителя.

Более жесткий заполнитель воспринимает большую долю нагрузки, несколько разгружая цементный камень. По мере проявления деформаций ползучести последнего происходит перераспределение напряжений в направлении еще большего нагружения высокопрочного заполнителя.

Менее жесткие пористые заполнители не могут в такой степени сдерживать пластические деформации цементного камня. Поэтому ползучесть легкого бетона обычно больше, чем ползучесть тяжелого бетона той же прочности.

Твердение цементного камня сопровождается усадкой, проявляющейся в уменьшении его объема. Линейные размеры образцов из цементного камня за год или несколько лет уменьшаются на 2 мм/м.

Заполнители в бетоне, препятствуя усадочным деформациям цементного камня, сопротивляются им и в результате оказываются обжатыми.

При обжатии зерен заполнителя их деформации обратно пропорциональны модулю упругости. Так, пористые заполнители деформируются значительнее, чем плотные; их сопротивление силам, возникающим при уменьшении объема цементного камня, меньше.

Поэтому усадка легких бетонов на пористых заполнителях больше и составляет примерно 0,5-0,7 мм/м. Тяжелый бетон на плотных жестких заполнителях дает усадку не более 0,2-0,4 мм/м.

На усадочные деформации бетона влияет не только качество, но и содержание заполнителей. Чем больше заполнителей в бетоне и меньше цементного камня, тем меньше усадка. Наибольшее насыщение объема бетона заполнителем достигается при оптимальном его зерновом составе и наибольшей предельной крупности.

Долговечность бетона также в значительной степени обусловлена свойствами применяемых заполнителей.

Весьма важна способность бетона противостоять многократному изменению температуры. Если разница между коэффициентами температурного расширения цементного камня и заполнителей велика, то при изменении температуры в бетоне могут развиваться значительные внутренние напряжения, аналогичные усадочным и иногда еще более опасные.

На способность бетона сопротивляться попеременному замораживанию и оттаиванию в насыщенном водой состоянии решающее влияние оказывают морозостойкость самих заполнителей, свойства, определяющие их сцепление с цементным камнем, и модуль упругости.

При использовании пористых заполнителей имеет значение следующий фактор.

Свободные поры заполнителя при замораживании бетона являются резервуаром для оттесненной воды за фронтом расширяющегося льда. Воздух в порах сжимается и служит амортизатором возникающего давления. Поэтому легкие бетоны на качественных пористых заполнителях характеризуются высокой морозостойкостью.

Природные плотные заполнители

В качестве крупного заполнителя для тяжелых и мелкозернистых бетонов применяются щебень, щебень из гравия и гравий из плотных горных пород по ГОСТ 8267, щебень из отсевов дробления плотных горных пород по ГОСТ 31424, щебень из доменных и ферросплавных шлаков черной металлургии по ГОСТ 5578, щебень из дробленого бетона и железобетона по ГОСТ 32495, щебень из шлаков ТЭЦ по ГОСТ 26644.

Средняя плотность крупного заполнителя должна быть в пределах от 2000 до 3000 кг/м^3 включительно.

Щебень из горных пород – неорганический зернистый сыпучий материал с зернами крупностью свыше 5 мм, получаемый дроблением годных пород, гравия и валунов, попутно добываемых вскрышных и вмещающих пород или некондиционных отходов горных предприятий по переработке руд (черных, цветных и редких металлов в металлургической промышленности) и неметаллических ископаемых других отраслей промышленности и последующим рассевом продуктов дробления.

Гравий из горных пород – неорганический зернистый сыпучий материал с зернами крупностью более 5 мм, получаемый рассевом природных гравийно-песчаных смесей.

Щебень и гравий выпускают в виде следующих основных фракций: 5 (3)-10 мм; 10-15 мм; 10-20 мм; 15-20 мм; 20-40 мм; 40-80 (70) мм и смеси фракций от 5(3) до 20 мм.

Полные остатки на контрольных ситах при рассеве щебня и гравия фракций 5 (3)-10 мм, 10-15 мм; 10-20 мм, 15-20 мм; 20-40 мм, 40-80 (70) мм и смеси фракций от 5(3) до 20 мм должны соответствовать указанным в табл. 5.4, где d и D – наименьшие и наибольшие номинальные размеры зерен.

Таблица 5.4

Полные остатки на контрольных ситах при рассеве щебня и гравия

Диаметр отверстия контрольного сита, мм	d	0,5(d + D)	D	1,25D
Полный остаток на сите, % по массе	90-100	30-60	до 10	до 0,5

Для щебня и гравия фракций от 5 (3) до 10 мм и смеси фракций от 5 (3) до 20 мм дополнительно применяются: нижние сита 2,5 мм (1,25 мм), полный остаток на которых составляет от 95 до 100 %.

Щебень из гравия и валунов должен содержать дробленые зерна в количестве не менее 80 % по массе.

Форма зерен щебня и гравия характеризуется содержанием зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы.

Щебень в зависимости от содержания зерен пластинчатой и игловатой формы подразделяется на пять групп (приложение 5).

Гравий не должен содержать зерен пластинчатой и игловатой формы более 35 % по массе.

Прочность щебня и гравия характеризуется маркой по дробимости при сжатии (раздавливании) в цилиндре.

Марки по дробимости щебня из осадочных и метаморфических пород, щебня из изверженных пород, щебня из гравия и гравия, марки по истираемости щебня и гравия должны соответствовать требованиям, указанным в приложении 5.

Содержание зерен слабых пород в щебне и гравии в зависимости от вида горной породы и марки по дробимости не должно превышать значений, приведенных в приложении 5.

Морозостойкость щебня и гравия характеризуется числом циклов замораживания и оттаивания, при котором потери в процентах по массе щебня и гравия не превышают установленных значений.

Допускается оценивать морозостойкость щебня и гравия по числу циклов насыщения в растворе сульфата натрия (Na_2SO_4) и высушивания.

Щебень и гравий по морозостойкости подразделяются на следующие марки: F15; F25; F50; F100; F150; F200; F300; F400.

Показатели морозостойкости щебня и гравия при испытании замораживанием и оттаиванием или насыщением в растворе Na_2SO_4 и высушиванием представлены в приложении 5.

Содержание пылевидных и глинистых частиц (размером менее 0,05 мм) в щебне и гравии в зависимости от вида горной породы и марки по дробимости, содержание глины в комках должно соответствовать значениям, указанным в приложении 5.

Щебень из попутно добываемых вскрышных и вмещающих пород и некондиционных отходов горных предприятий по переработке руд (черных, цветных и редких металлов металлургической промышленности) и неметаллических ископаемых других отраслей промышленности должен быть устойчивым против всех видов распадов (приложение 5).

Щебень и гравий, предназначенные для применения в качестве заполнителей для бетонов, должны обладать стойкостью к химическому воздействию щелочей цемента.

Стойкость щебня и гравия определяется по минералого-петрографическому составу исходной горной породы и содержанию вредных компонентов и примесей, снижающих долговечность бетона и вызывающих коррозию арматуры железобетонных изделий и конструкций.

К компонентам, снижающим прочность и долговечность бетона, относятся включения: глинистых минералов (монтмориллонита, каолинита и др.); слюд и гидрослюд и других слоистых силикатов; асбеста; органических веществ (угля, лигнита, горючих сланцев, гумусовых кислот и др.); минералов, неустойчивых к процессам выветривания (хлорита, цеолита апатита, нефелина, фосфорита).

Компонентами, вызывающими ухудшение качества поверхности и внутреннюю коррозию бетона, являются включения:

- пород и минералов, содержащих аморфные разновидности диоксида кремния (халцедон, опал и др.);
- серосодержащих пород и минералов (пирит, марказит, пирротин и другие сульфиды, а также гипс, ангидрит и другие сульфаты);
- пород и минералов, содержащих оксиды и гидрооксиды железа (магнетит, гетит и др.);
- слюд, гилрослюд и других слоистых силикатов.

К компонентам, вызывающим коррозию арматуры в бетоне, относятся включения галогеносодержащих минералов (пирит, марказит, пирротин и другие сульфиды, гипс, ангидрит и другие сульфаты).

Щебень и гравий применяют в бетоне без ограничений, если содержание пород и минералов, относимых к вредным компонентам, соответствует данным, представленным в приложении 5.

В качестве мелкого заполнителя для бетонов применяются природный песок по ГОСТ 8736, песок из отсевов дробления горных пород по ГОСТ 31424, их смеси, песок из доменных и ферросплавных шлаков черной металлургии по ГОСТ 5578, а также мелкозернистые золошлаковые смеси по ГОСТ 25592.

Истинная плотность мелкого заполнителя должна быть в пределах от 2000 до 2800 кг/м^3 включительно.

Песок – природный неорганический сыпучий материал с крупностью зерен до 5 мм, образовавшийся в результате естественного разрушения скальных горных пород и получаемый при разработке валунно-гравийно-песчаных, гравийно-песчаных и песчаных месторождений.

Обогащенный песок – природный неорганический сыпучий материал с крупностью зерен до 5 мм, с улучшенным зерновым составом и меньшим содержанием пылевидных и глинистых частиц, полученный с использованием специального оборудования.

Фракционированный песок – природный неорганический сыпучий материал, разделенный на две или более фракций с использованием специального оборудования.

В зависимости от зернового состава и содержания пылевидных и глинистых частиц песок подразделяется на два класса: I и II (приложение 6).

Песок классов I и II в зависимости от крупности зерен (модуля крупности) делится на группы: песок класса I – повышенной крупности, крупный, средний и мелкий; песок класса II – повышенной крупности, крупный, средний, мелкий, очень мелкий, тонкий и очень тонкий.

Каждая группа песка характеризуется значением модуля крупности $М_к$, указанным в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Модуль крупности песка

Группа	Модуль крупности $М_к$
Повышенной крупности	3-3,5
Крупный	2,5-3
Средний	2-2,5
Мелкий	1,5-2
Очень мелкий	1-1,5
Тонкий	0,7-1
Очень тонкий	до 0,7

Полный остаток песка на сите № 063 должен соответствовать значениям, представленным в табл. 5.6.

Обогащенный песок характеризуется следующими показателями качества: модулем крупности; зерновым составом; содержанием пылевидных и глинистых частиц, в том числе глины в комках.

Таблица 5.6

Полный остаток песка на сите № 063

Группа	Полный остаток на сите № 063, % по массе
Повышенной крупности	65-75
Крупный	45-65
Средний	30-45
Мелкий	10-30
Очень мелкий	до 10
Тонкий	не нормируется
Очень тонкий	

Модуль крупности обогащенного песка должен соответствовать значениям, приведенным в табл. 5.5, а полный остаток на сите № 063 – в табл. 5.6.

Обогащенный песок по зерновому составу относится к пескам класса I повышенной крупности, крупным, средним и мелким (приложение 6).

Фракционированный песок выпускается следующих фракций (или их смесей): 2,5-5 мм; 1,25-2,5 мм; 0,63-1,25 мм; 0,315-0,63 мм; 0,16-0,315 мм.

Содержание в фракционированном песке зерен размером свыше 5 мм, определяемое по фракции 2,5 – 5 мм, не должно превышать 5 % по массе.

Содержание в каждой фракции данного песка зерен размером более наибольшего размера и зерен менее наименьшего размера составляет не более 5 % по массе.

Содержание в фракционированном песке пылевидных и глинистых частиц должно быть не более 1 % по массе для фракции 2,5 – 5 мм и 1,5 % – для остальных фракций.

Песок, обогащенный песок и фракционированный песок, предназначенные для применения в качестве заполнителей для бетонов, должны обладать стойкостью к химическому воздействию щелочей цемента.

Допустимое содержание пород и минералов, относимых к вредным компонентам и примесям, в песке не должно превышать значений, представленных в приложении 6.

Щебень, гравий и песок не должны содержать посторонних засоряющих примесей.

В зависимости от значений суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов $А_{эфф.}$ они применяются:

- при $А_{эфф.}$ до 370 Бк/кг – во вновь строящихся жилых и общественных зданиях;

- при $А_{эфф.}$ от 370 до 740 Бк/кг – для дорожного строительства в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных зданий и сооружений;

- при $А_{эфф}$ от 740 до 1500 Бк/кг – в дорожном строительстве вне населенных пунктов.

Искусственные пористые заполнители

В качестве искусственных пористых заполнителей, изготавливаемых из минерального сырья в результате промышленной переработки, включая термическое или иное воздействие, для легких бетонов применяются гравий (керамзитовый, шунгизитовый, аглопоритовый), щебень (керамзитовый, шлакопемзовый, аглопоритовый) и песок (керамзитовый дробленый и обжиговый, шунгизитовый, аглопоритовый, шлакопемзовый) с плотностью зерен в сухом состоянии не более 2000 кг/м^3.

Шунгизитовый гравий получается обжигом со вспучиванием подготовленных гранул (зерен) из шунгитового сырья, содержащего тонкораспределенный аморфный углерод – шунгит.

Аглопоритовый гравий, имеющий округлую или гравелистую форму, получается спеканием песчано-глинистых пород на решетках агломерационной машины.

Аглопоритовый щебень получается спеканием песчано-глинистых пород на решетках агломерационной машины непрерывного или переменного действия.

Керамзитовый гравий ячеистого строения округлой или гравелистой формы с шероховатой поверхностью получается при вспучивании (увеличении в объеме) полуфабриката в результате обжига легкоплавкого глинистого сырья.

Керамзитовый щебень произвольной, преимущественно угловатой формы получается при вспучивании в результате обжига фракционированного камнеподобного глинистого сырья или дроблении керамзита фракции более 20 мм.

Шлакопемзовый щебень получается поризацией расплава шлаков металлургического производства.

Искусственные пористые заполнители в зависимости от размеров зерен подразделяются на:

- крупный заполнитель (гравий и щебень) размером зерен 5-40 мм;

- мелкий заполнитель (песок) размером зерен менее 5 мм.

Гравий и щебень изготавливаются следующих основных фракций: 5-10 мм; 10-20 мм; 20-40 мм.

Полные остатки на контрольных ситах при рассеве искусственных пористых заполнителей (гравия и щебня) представлены в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Полные остатки на контрольных ситах при рассеве искусственных пористых заполнителей (гравия и щебня)

Диаметр отверстия контрольного сита, мм	d	D	2D
Полный остаток на сите, % по массе	85-100	до 10	не допускается

Массовая доля зерен мелкой фракции пористого заполнителя (меньше d) не должна превышать 15 %, а крупной фракции (больше D) – 10 %.

Пористый песок в зависимости от области применения подразделяется на три группы:

1 – песок для легкого конструкционного бетона;

2 – песок для легкого конструкционно-теплоизоляционного бетона;

3 – песок для легкого теплоизоляционного бетона.

Зерновой состав пористого песка, применяемого для изготовления легких конструкционно-теплоизоляционных и конструкционных бетонов, должен находиться в пределах, указанных в табл. 5.8.

Зерновой состав пористого песка, применяемого для изготовления теплоизоляционных бетонов, не нормируется.

В зависимости от насыпной плотности пористые заполнители (гравий, щебень и песок) подразделяются на марки (приложение 7).

Минимальная и максимальная марки по насыпной плотности пористых гравия, щебня и песка должны соответствовать приведенным в приложении 7.

В зависимости от прочности при сдавливании в цилиндре пористые гравий и щебень делятся на марки (приложение 7).

Таблица 5.8

Зерновой состав пористого песка

Размер отверстия контрольного сита, мм	Полный остаток на сите, % по объему, для бетона	
	конструкционно-теплоизоляционного	конструкционного
5	0-10	0-10
2,5	10-40	15-35
1,25	20-60	30-50
0,63	30-70	40-65
0,315	45-80	65-90
0,16	70-90	90-100
менее 0,16	10-30	0-10

Среднее значение коэффициента формы зерен (отношения наибольшего размера зерен к наименьшему) пористого гравия должно быть не более 1,5.

При этом количество зерен с коэффициентом формы более 1,5 составляет не более 15 % для гравия, применяемого для легких бетонов классов по прочности на сжатие В12,5 включительно, и не более 10 % – для легких бетонов классов по прочности на сжатие выше В12,5.

Соотношения между насыпной плотностью, прочностью, марками по насыпной плотности и прочности пористых гравия и щебня приведены в приложении 7.

Коэффициент размягчения (отношение прочности заполнителя в насыщенном водой состоянии к прочности заполнителя в сухом состоянии) пористых гравия и щебня должен быть не менее 0,75.

В пористых гравии, щебне и песке, применяемых в качестве заполнителей для армированных легких бетонов, содержание водорастворимых сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO_3 не должно превышать 1 % по массе.

Водопоглощение пористых гравия и щебня в течение 1 ч составляет, % по массе, не более: 30 – для марок по насыпной плотности до М400; 25 – для марок по насыпной плотности М450 – М600; 20 – для марок по насыпной плотности М700 – М1000.

Влажность искусственных пористых заполнителей должна быть не более 5 % по массе, а потеря массы при кипячении, %, не более: 5 – для керамзитовых гравия и щебня; 4 – для шунгизитового гравия.

Аглопоритовые гравий, щебень и шлакопемзовый щебень должны быть устойчивы против силикатного распада. Потеря массы при определении стойкости против силикатного распада не должна превышать, %: 5 – для шлакопемзового щебня; 8 – для аглопоритовых гравия и щебня.

Потеря массы при прокаливании составляет, %, не более: 3 – для аглопоритовых гравия и щебня; 5 – для аглопоритового песка.

Содержание слабообожженных зерен не должно превышать, % по массе: 5 – для аглопоритовых гравия и щебня; 3 – для керамзитового песка, полученного в печах кипящего слоя.

Для искусственных пористых заполнителей, применяемых для изготовления легких теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных бетонов, определяется теплопроводность. Удельная эффективная активность естественных радионуклидов их не должна превышать 370 Бк/кг.

5.4 Вода

Для приготовления бетонных смесей, ухода за твердеющим бетоном и промывки заполнителей применяется вода следующих видов:

- питьевая;
- естественная поверхностная и грунтовая;
- техническая;
- морская и засоленная;
- после промывки оборудования для приготовления и транспортирования бетонной смеси;
- смесь из двух или более указанных выше источников.

Не допускается использование сточной, болотной и торфяной воды.

Вода не должна содержать химических соединений и примесей в количествах, которые могут повлиять на сроки схватывания цемента, скорость твердения, прочность, морозостойкость и водонепроницаемость бетона, коррозию арматуры.

Содержание в воде растворимых солей (РС), сульфатов, хлоридов и взвешенных частиц (ВЧ) в зависимости от ее назначения не должно превышать значений, указанных в табл. 5.9.

Общее содержание в воде ионов натрия Na^+ и калия K^+ в составе растворимых солей не должно превышать 1500 мг/л, нитратов – 500 мл/л, сульфидов, сахаров, фосфатов и цинка – 100 мл/л.

Допускается к применению вода при наличии на поверхности только следов (радужной пленки) нефтепродуктов, масел и жиров, при интенсивности запаха не более двух баллов.

Водородный показатель воды pH должен быть не менее 4 и не более 12,5, окисляемость – не более 15 мг/л.

Окраска воды должна находиться в пределах от бесцветной до желтоватой с цветностью не выше 70° по ГОСТ 3351. Если к бетону предъявляются требования технической эстетики, цветность воды не должна превышать 30°.

Таблица 5.9

Содержание в воде растворимых солей, сульфатов, хлоридов и взвешенных частиц

Назначение воды	Максимальное допустимое содержание, мг/л			
	РС	ионов SO_4^{2-}	ионов Cl^-	ВЧ
Вода для затворения бетонной смеси при изготовлении напряженных железобетонных конструкций	2000	600	500	200
Вода для затворения бетонной смеси при изготовлении бетонных и железобетонных конструкций с ненапрягаемой арматурой	5000	2700	1200	200
Вода для затворения бетонной смеси при изготовлении бетонных неармированных конструкций, к которым не предъявляются требования по ограничению образования высолов	10000	2700	4500	300
Вода для промывки заполнителей, включая мокрую контрольную сортировку и охлаждение заполнителей	5000	2000	1200	500
Вода для поливки рабочих швов при перерывах в бетонировании, поверхностей стыков, подлежащих омоноличиванию	1000	500	500	200
Вода для поливки законченных наружных поверхностей бетонных и железобетонных конструкций	5000	2700	1200	500
Вода для поливки наружных поверхностей бетонных конструкций, если на поверхности допускается появление выцветов, высолов	35000	2000	20000	500

Вода, содержащая пенообразующие поверхностно-активные вещества,

пригодна для применения при стойкости пены не более 2 мин. Допускается применение воды со стойкостью пены, равной 2 мин и более при условии, если пригодность воды установлена сравнительными испытаниями по определению физико-технических свойств бетонной смеси и бетона.

5.5 Добавки

Для модифицирования свойств бетонных смесей и бетонов, изготавливаемых на вяжущих на основе портландцементного клинкера, а также с целью экономного расходования цемента, снижения энерго- и трудозатрат при производстве бетонных работ применяются различные **добавки** – органические или неорганические вещества, вводимые в смеси в процессе их приготовления с целью направленного регулирования технологических и строительно-технических свойств цементных бетонов или придания им новых свойств.

В зависимости от основного эффекта действия добавки подразделяются на следующие классы (по ГОСТ 24211):

1 Добавки, регулирующие свойства бетонных смесей

1.1 Пластифицирующие:

- суперпластифицирующие, повышающие подвижность бетонных смесей от П1 до П5 (Master Glenium 115, Qz, Elocrete, С-3, Полипласт СП-1, Полипласт СП-3, Полипласт СП-4, Полипласт Премиум, Линамикс СП-180 и др.);
- пластифицирующие, повышающие подвижность бетонных смесей от П1 до П2-П4 (Лигнопан Б-3, Лигнопан Б-1, Полипласт Лигно, Линамикс П 120 (90), лигносульфонаты технические, лигносульфонат технический модифицированный ЛСТМ-2 и др.).

1.2 Водоредуцирующие:

- суперводоредуцирующие, снижающие водопотребность бетонных смесей более чем на 20 % (суперпластификаторы и комплексные добавки на их основе);
- водоредуцирующие, снижающие водопотребность бетонный смесей от 7 до 20 % (пластификаторы и комплексные добавки на их основе).

1.3 Стабилизирующие, снижающие расслаиваемость бетонных смесей в 2 раза и более (Реостаб, Полипласт СП-2ВУ, метилцеллюлоза, бентонитовая глина и др.).

1.4 Регулирующие сохраняемость подвижности, увеличивающие или снижающие сохраняемость первоначальной подвижности бетонных смесей в 1,5 раза и более (добавки замедлители или ускорители схватывания).

1.5 Увеличивающие воздухо- или газосодержание:

-воздухововлекающие (Полипласт ВВ, Полипласт Аэро, смола древесная омыленная и др.);

- газообразующие (пудра алюминиевая ПАП, ПАП-1, ПАК, пергидроль технический, полигидросилоксаны и др.);
- пенообразующие (Ареком-4, ПБ-Люкс, Морпен, Пеностром и др.).

2 Добавки, регулирующие свойства бетонов

2.1 Регулирующие кинетику твердения:

- ускорители процесса твердения бетонов в возрасте 1 суток нормального твердения на 30 % и более (Реламикс, карбонат калия, хлорид кальция, нитрит-нитрат кальция, нитрит-нитрат-хлорид кальция, сульфат натрия, нитрат натрия, алюминат натрия и др.);

- замедлители процесса твердения бетонов в возрасте 1 суток нормального твердения на 30 % и более (Линомикс, кремнийорганическая жидкость, кормовая сахарная патока, молочная сыворотка и др.).

2.2 Повышающие прочность бетонов в возрасте 28 суток на 20 % и более (суперпластификаторы, ускорители твердения и др.).

2.3 Снижающие проницаемость, кольматирующие добавки, увеличивающие водонепроницаемость бетонов на две марки и более (диэтиленгликолевая смола, полиаминная смола, битумная эмульсия (эмульбит), сульфат железа, хлорид железа, нитрат кальция, сульфат алюминия и др.).

2.4 Повышающие защитные свойства по отношению к стальной арматуре, усиливающие защитное действие бетонов по отношению к коррозии стальной арматуры (нитрит натрия, нитрит-нитрат кальция, тетраборат натрия, бихромат калия, катапин-ингибитор КИ-1 и др.).

2.5 Повышающие морозостойкость бетонов в условиях многократного попеременного замораживания и оттаивания на две марки и более (нитрит натрия, хлорид натрия, карбонат калия, хлорид кальция, мочевина и др.).

2.6 Повышающие коррозионную стойкость, увеличивающие коррозионную стойкость бетонов в условиях воздействия различных агрессивных сред (карбонат бария, высокоактивные пуццоланы, доменные гранулированные шлаки, фторид натрия или калия, кремнийорганические соединения, битумная эмульсия и др.).

2.7 Расширяющие, компенсирующие усадку, обеспечивающие деформации расширения бетонов (алюминатносульфатная, алюмооксидная добавки и др.).

3 Добавки, придающие бетонам специальные свойства

3.1 Противоморозные:

- для «холодного» бетона, обеспечивающие твердение бетонов при их отрицательных температурах (Карбамид (мочевина) М, Асол-К, Гидрозим, формиат натрия спиртовой и др.);

- для теплого» бетона, обеспечивающие защиту бетонных смесей от замерзания на время от ее изготовления до укладки и подачи внешнего тепла (Криопласт СП15-1, Криопласт П20, Криопласт Премиум, Полипласт ПМП, Лигнопан Б-4, Бенотех ПМП-1 и др.).

3.2 Гидрофобизирующие, придающие бетонам водоотталкивающие свойства (олеат натрия, стеарат кальция, ГКЖ-10, ГКЖ-11, полигидросилоксаны и др.).

4 Минеральные добавки:

- тип I – активные минеральные добавки (АМД), обладающие вяжущими, расширяющими или пуццоланическими свойствами;

- тип II – инертные минеральные добавки (ИМД), не способные к взаимодействию с продуктами гидратации цемента и применяемые в качестве микронаполнителей.

Механизм действия пластифицирующих добавок

Пластифицирующие добавки различных классов, и особенно суперпластификаторы (СП), широко применяются в строительстве и позволяют за счет снижения водоцементного отношения при сохранении заданной подвижности бетонной смеси значительно повышать прочность и долговечность цементных бетонов.

Механизм диспергирующего и реологического действия СП на цементно-водные системы обусловлен протеканием следующих физико-химических процессов:

- адсорбцией молекул СП на поверхности цементных минералов и гидратных новообразований;

- коллоидно-химическим предотвращением коагуляции (агрегации);

- электрокинетическим явлением, определяющим электростатическое отталкивание частиц при изменении дзета-потенциала с введением СП.

Химическая общность всех пластификаторов заключается в наличии кислородных групп в молекуле, на которых локализован или делокализован отрицательный заряд, за счет ионизации мономерной или олигомерной молекулы в щелочной среде. Адсорбция последних осуществляется вследствие нуклеофильной атаки активных центров поверхности.

Адсорбционная и наивысшая пластифицирующая способности зависят от величин индукционных эффектов (наличия в молекуле электронооттягивающих групп), величин мезомерных (резонансных) эффектов, то есть выравнивания зарядов и связей вследствие делокализации электронов по анионоактивной функциональной группе или в целом по молекуле.

Для обеспечения максимального разжижающего эффекта пластификаторы не должны способствовать образованию пространственных коагуляционных структур, как в объеме, так и в поверхностных слоях твердых веществ при адсорбции.

Механизм пластифицирующего действия СП зависит от степени поликонденсации. Наибольший пластифицирующий эффект обеспечивают «тяжелые» (число молекул в цепи 10-17), а не «средние» фракции СП. Вместе с тем с ростом длины цепи увеличивается вероятность появления «мостикового» эффекта одновременной адсорбции полимерных молекул на двух и более частицах вяжущего, что может привести к снижению дезагрегирующей способности СП.

По своей природе СП разделяются на четыре группы:

I – сульфированные меламиноформальдегидные смолы;

II – продукты конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида;

III – модифицированные (очищенные и практически не содержащие сахаров) лигносульфонаты;

IV – добавки на основе поликарбоксилатов.

Суперпластификаторы представляют собой анионактивные органические вещества коллоидного размера с большим количеством полярных групп в цепи. При адсорбции на зернах цемента и новообразованиях СП создают «стерический» эффект отталкивания, который обусловлен формами цепей и характером зарядов на поверхности зерен цемента и гидратов.

В технологии цементных бетонов широко используются **суперпластификаторы на поликарбоксилатной основе**, механизм действия которых заключается в том, что частицы поликарбоксилатов адсорбируются на поверхности цементных зерен и сообщают им отрицательный заряд. В результате цементные зерна взаимно отталкиваются и приводят в движение цементный раствор (рис. 5.3).

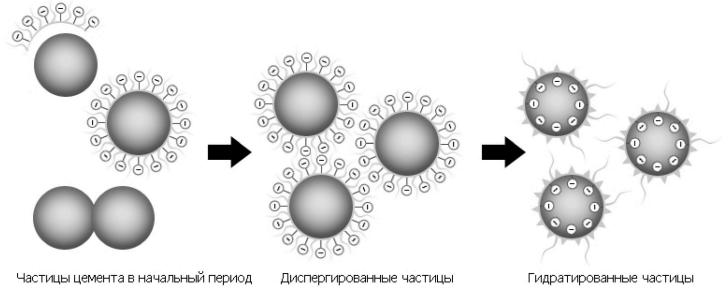


Рис. 5.3. Механизм действия поликарбоксилатного суперпластификатора

Только небольшая часть цементного зерна покрыта полимером, и свободной поверхности флокулы цемента достаточно для доступа воды и протекания реакции гидратации. Структуры поликарбоксилатных СП различаются по длине основной цепи, длине и количеству боковых цепей, ионному заряду.

Действие СП ограничивается 2-3 ч с момента их введения, и после первоначального замедления процессов гидратации и образования коагуляционной структуры наступает ускорение твердения бетона.

Это объясняется тем, что адсорбционный слой добавки на поверхности зерен цемента проницаем для воды, а дефлокулирующее действие СП увеличивает поверхность контакта цемента и воды, что приводит к увеличению степени гидратации и росту числа гидратных новообразований.

Суперпластификаторы вводятся в бетонные смеси в виде водных растворов рабочей концентрации из расчета содержания добавки в пределах 0,3-1,5 % от массы цемента.

Водоредуцирующие добавки – вещества, позволяющие получать бетонные смеси со сниженным расходом воды (водоредуцирующий эффект).

Кроме эффекта водоредуцирования, подобные добавки способствуют снижению расслаиваемости и повышению удобоукладываемости БС, снижению проницаемости, повышению прочности, морозостойкости и коррозионной стойкости бетонов.

Механизм действия стабилизирующих добавок

Эффективность стабилизирующих добавок оценивается по снижению показателей расслаиваемости (растворотделения и (или) водоотделения) бетонных смесей.

Механизм действия **стабилизирующих добавок** заключается в изменении свойств поверхности частиц твердой фазы, что приводит к изменению соотношения между связанной и свободной водой.

Вследствие увеличения количества связанной воды происходит стабилизация цементной системы, способствующая сохраняемости технологических свойств БС.

При введении стабилизирующих добавок происходит увеличение дисперсности твердой фазы. Это способствует активации межчастичного взаимодействия, созданию пространственной структурной сетки и снижению водо- и растворотделения.

Стабилизирующее действие добавок может объясняться особенностями образования водородных связей их кислородных атомов с коллоидными цементными частицами.

Молекулы добавок связывают динамически свободную воду, что приводит к повышению вязкости ее в межчастичных зазорах и стабилизации системы.

Механизмы действия воздухововлекающих, пено- и газообразующих добавок

Воздухововлекающие добавки – поверхностно-активные вещества (ПАВ), способствующие вовлечению в бетонную смесь при ее перемешивании мелкодисперсного воздуха, равномерно распределенного в объеме БС.

Действие воздухововлекающих добавок состоит в основном в насыщении цементной матрицы микропузырьками воздуха размером от 0,003 до 0,015 мм, которые повышают технологические свойства БС и повышают морозостойкость бетонов.

Воздухововлекающий эффект добавок обеспечивается тем, что они вводятся в бетонные смеси в виде щелочных мыл, которые обладают пенообразующей способностью.

Эффективность воздухововлекающих добавок зависит от их поверхностной активности и пенообразующей способности, которая связана с

поверхностным натяжением растворов, уменьшающимся с увеличением концентрации добавки в растворе.

Пенообразующие добавки – ПАВ, обеспечивающие возможность получения технической пены требуемых кратности и стойкости и позволяющие при смешивании с компонентами БС получать бетоны ячеистой или поризованной структуры.

Механизм действия и эффективность пенообразующих добавок близки к воздухововлекающим добавкам.

Газообразующие добавки – вещества, способные выделять газ в результате их химического взаимодействия с продуктами гидратации цемента.

Поризация основана на образовании в тесте вяжущих газовых пузырьков, создающих ячеистую структуру цементного или известково-силикатного теста. Процесс вспучивания основывается на совпадении периода наибольшего газообразования с вязкопластичным состоянием БС, то есть момента, когда смесь свободно деформируется под действием выделяющегося газа, но удерживает его в себе.

Источником газообразования является свободный водород, который образуется в результате химического взаимодействия газообразующих добавок (порошки алюминия, магния, цинка и др.) с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидролизе трехкальциевого силиката и других минералов цемента.

Высокодисперсный порошок алюминия окисляется и превращается в гидроалюминат кальция с выделением молекулярного водорода:

$$2Al + 3Ca(OH)_2 + nH_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot nH_2O + 3H_2\uparrow. \qquad (5.1)$$

В результате химической реакции из 1 кг алюминия выделяется при нормальных условиях 1,254 л водорода, а при 50 °С объем водорода составляет 1,48 л.

Алюминиевая пудра перед применением депарафинизируется прокаливанием в течение 1,5 ч при температуре 200 °С.

Непрокаленная алюминиевая пудра вводится в газобетонную смесь в виде водной суспензии, приготовленной из пудры, воды и ПАВ в соотношении (1:10:0,625) по массе.

Механизмы действия добавок, регулирующих кинетику твердения бетонов

Добавки-ускорители твердения широко применяются в технологии бетона как индивидуально, так и в составе комплексных модификаторов. В последнем случае ускорители используются для снижения замедляющего действия на кинетику твердения и прочность бетонов пластифицирующих, воздухововлекающих, пенообразующих и других органических добавок.

В монолитном строительстве ускоряющие добавки применяют с целью повышения темпов твердения бетона и сокращения сроков его выдерживания перед распалубкой.

В технологии сборного бетона и железобетона ускорители твердения используют для сокращения сроков предварительного выдерживания и режимов тепловлажностной обработки (ТВО) изделий.

Эффективные ускорители позволяют снижать продолжительность ТВО бетона на 20-30 %, а также снижать температуру прогрева до 50-60 °С. В заводских условиях это позволяет значительно сокращать оборачиваемость форм и в целом металлоемкость производства и энергетические затраты.

При рациональном использовании ускоряющих и комплексных добавок, с учетом химико-минералогического состава цемента и оптимально подобранного состава бетонов, они позволяют снижать расход цемента на 10-15 %.

Таким образом, применение добавок-ускорителей является эффективным технологическим приемом, позволяющим не только сокращать продолжительность набора бетоном требуемой прочности, но и в целом снижать себестоимость продукции и повышать технико-экономические показатели производства.

Добавки-ускорители твердения широко применяются при производстве бетонных работ в период низких положительных и отрицательных температур с целью обеспечения ухода за бетонной смесью и сокращения времени набора бетоном критической прочности.

Применение ускоряющих добавок, особенно из числа низкомолекулярных соединений с низкой температурой замерзания растворов, позволяет выдерживать бетон при температуре ниже расчетной без опасности его размораживания.

В суровых климатических условиях использование добавок-ускорителей наиболее эффективно совместно с электропрогревом бетона и бетонированием методом «термоса».

В основу классификации добавок-ускорителей твердения по механизму действия положено деление их на четыре класса.

Добавки-ускорители первого класса повышают или понижают растворимость исходного вяжущего вещества и конечных продуктов его гидратации вследствие изменения ионной силы раствора. Они разделены на две группы: не содержащие и содержащие с вяжущим одноименные ионы. К подобным добавкам принадлежат многие сильные и слабые электролиты, соли, гидролизующиеся с повышением pH среды, щелочи, а также неэлектролиты.

Ускоряющий гидратационное твердение эффект добавок, содержащих одноименные с вяжущим ионы, обусловлен тем, что они резко увеличивают вероятность возникновения зародышей новой фазы.

Для силикатных фаз цемента добавки, содержащие с ним одноименные ионы (хлорид, нитрат и нитрит кальция), являются ускорителями твердения по двум причинам: во-первых, клинкерные минералы, кинетика гидратации

которых в значительной степени определяется стадией растворения, весьма «чувствительны» к ускорению акта возникновения зародышей новой фазы; во-вторых, при введении подобных добавок сверх определенного количества возможна их реакция с гидроксидом кальция с образованием соответствующих двойных солей, благодаря чему повышается растворимость $Ca(OH)_2$, C_3S и C_2S.

Добавки-ускорители второго класса, реагирующие с вяжущими с образованием труднорастворимых соединений, делятся на две группы – добавки, участвующие с вяжущим или продуктами его гидратации: в реакциях присоединения; в обменных реакциях.

При взаимодействии добавок второго класса и комплексных на их основе с минералами портландцементного клинкера образуются в основном двойные соли-гидраты: гидросульфоалюминаты, гидрохлоралюминаты, гидронитроалюминаты, гидрокарбоалюминаты, гидрооксинитраты кальция.

Для добавок второго класса характерно то, что продукты реакции их с минералами цемента принимают участие в формировании структуры цементного камня, осаждаясь на вяжущих в виде пленок или кольматируя поры. К таким добавкам относится известные ускорители твердения $CaCl_2$, $Ca(NO_3)_2$, $Ca(NO)_2$.

В результате реакций присоединения минералов цемента и добавок второго класса отмечается повышение прочности структур твердения плотности и непроницаемости цементных материалов.

Это обусловлено тем, что в соответствии с механизмом действия добавок, происходит быстрое образование первичного структурного каркаса из двойных солей-гидратов и гидроксисолей, обрастающего затем гидросиликатами кальция.

Добавки, вступающие с вяжущими в обменные реакции, подразделяются на шесть типов.

При использовании **добавок первого типа** (солей сильного основания и сильной или слабой кислоты: NaCl, KCl, $NaNO_2$, KNO_2, $NaNO_3$, CH_3COONa и др.) создается постоянная концентрация щелочных металлов в цементной системе.

К **добавкам второго типа** относятся гидролизующиеся соли сильного основания и слабой кислоты ($NaAlO_3$, Na_2SiO_3, K_2SiO_3). Важнейшей особенностью действия подобных добавок является образование гидроалюминатов либо гидросиликатов кальция, близких по составу и свойствам к тем, которые возникают при гидратации портландцемента

К **добавкам третьего типа** относятся соли сильного основания и сильной, умеренно сильной и слабой кислот (Na_2CO_3, K_2CO_3, Na_2SO_4, K_2SO_4). При введении подобных добавок в бетон их анионы образуют с ионами кальция труднорастворимые соединения.

Добавки четвертого типа – кислоты, вступающие с $Ca(OH)_2$ в реакции нейтрализации. Механизм действия данных добавок отличается первой стадией – нейтрализацией кислоты гидроксидом кальция с образованием соответствующих солей.

Добавки пятого типа – соли сильной кислоты и слабого основания (азотнокислые, сернокислые и солянокислые соли аммония, железа, алюминия, цинка и др.). Общим признаком таких добавок является их способность к реакциям нейтрализации. В результате гидролиза таких солей происходит сильное подкисление раствора и образование при этом гидроксидов металлов, что существенно сказывается на кинетике твердения цемента.

К **добавкам шестого типа** относятся вещества, способные к образованию с ионами кальция прочных молекулярных комплексов или комплексных ионов (трилон Б), с помощью которых возможно регулировать процессы твердения вяжущих.

Добавки-ускорители третьего класса – готовые центры кристаллизации, облегчают выделение новой фазы из пересыщенного раствора и поэтому применение их в качестве ускоряющих твердение добавок эффективно лишь тогда, когда скорость процесса кристаллизации новообразований определяет скорость твердения вяжущего (например, для гипса).

В ряде случаев наблюдается ускоряющий эффект от введения в портландцемент добавок гидросульфоалюмината кальция, на частицах которого кристаллизуется гидросульфоалюминат из раствора, в связи с чем уменьшается его экранирующее действие.

Добавки четвертого класса – водоредуцирующие и гидрофобизирующие ПАВ.

Рекомендуемый расход добавок-ускорителей твердения бетона в зависимости составляет 1-3 % от массы цемента.

Добавки-замедлители твердения применяются в монолитном строительстве для сохранения технологических свойств бетонных смесей, а также в случае возникновения в производстве бетонных работ технологических перерывов, для бетонирования при высоких температурах, при транспортировании БС на значительные расстояния.

По химическому составу замедлители твердения принадлежат к той же категории, что и добавки, снижающие водопотребность бетонных смесей.

Замедление обусловлено адсорбцией добавок на частицах негидратированного цемента и продуктах его гидратации, при этом водородные или дипольные связи препятствуют на определенное время контакт с водой.

Добавки-замедлители твердения используются в основном в виде водных растворов плотностью 1100-1300 кг/м^3 в количестве 0,3-1,5 % от массы цемента в перерасчете на сухое вещество.

Механизмы действия добавок, повышающих прочность и снижающих проницаемость бетонов

В процессе твердения бетона происходит заполнение капиллярных пор продуктами гидратации и перераспределение между существующими уровнями гелевых, контракционных, капиллярных и условно замкнутых пор. Изменения

параметров пористости цементного камня в значительной степени определяют прочность бетонов.

Объем гелевых пор, занимающих около 30 % цементного камня в сухом состоянии, вследствие особых свойств и условий их формирования, как с добавками, так и без них, изменяется меньше, чем объем других уровней.

Микропоры (микрокапилляры) в наибольшей степени влияют на прочность цементных бетонов, поскольку в них происходят основные фазовые превращения при гидратации клинкерных минералов.

Капиллярные поры существенно влияют на прочность бетона. При увеличении капиллярной пористости увеличиваются водопоглощение и равновесная влажность, что приводит к снижению прочности.

В качестве **добавок, повышающих прочность бетонов**, применяются ускорители твердения, которые, активируя в цементной системе образование гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, а также двойных и основных солей-гидратов, способствуют тем самым формированию прочной поликристаллической и микропористой структуры, обладающей высокими показателями прочности.

Для повышения прочности бетонов средних классов и высокопрочных обязательным является применение водоредуцирующих добавок, позволяющих в значительной степени сокращать водоцементное отношение и улучшать структуру бетона.

К **добавкам, снижающим проницаемость бетонов**, можно в равной степени отнести индивидуальные и комплексные модификаторы, повышающие прочность.

При изготовлении бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в средне- и сильноагрессивных средах, для получения плотной структуры и снижения проницаемости бетона применяются **кольматирующие добавки** – вещества, способствующие заполнению пор в бетоне водонерастворимыми продуктами (тонкодисперсные минеральные вещества, обладающие гидравлической или пуццоланической активностью, а также водорастворимые полимеры).

Механизм действия добавок, повышающих защитные свойства бетонов по отношению к стальной арматуре

Добавки-ингибиторы коррозии стали – вещества, обеспечивающие высокую коррозионную стойкость арматуры в агрессивных по отношению к ней средах.

Критерием эффективности добавок, увеличивающих защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре, является: отсутствие коррозии арматуры; плотность тока пассивации стали не более 10 мА/см^2 при потенциале плюс 300 мВ.

Механизм действия добавок-ингибиторов коррозии стали заключается в том, что в их присутствии происходит интенсивное окисление растворимого

оксида двухвалентного железа и образование на поверхности стали пассивирующих защитных пленок из гидроксида железа.

Некоторые добавки-ингибиторы коррозии стали способствуют увеличению подвижности бетонной смеси, снижению диффузионной проницаемости бетона, увеличению электропроводности и морозостойкости бетона.

Ингибиторы на основе солей натрия увеличивают защитный потенциал реакции заполнителя со щелочью, особенно если применяются реакционноспособные заполнители.

В качестве ингибиторов коррозии стали в составе комплексных добавок могут использоваться химические вещества, способствующие при взаимодействии с металлом образованию хелатных соединений (защитных пленок) на поверхности стальной арматуры бетона, защищающих ее от коррозии.

Механизмы действия добавок, повышающих морозо- и коррозионную стойкость бетонов

Наиболее распространенным способом повышения морозостойкости бетонов является нормирование содержания воздуха в бетонной смеси.

Оптимальный объем пор, обеспечивающий высокую морозостойкость без существенной потери прочности, должен составлять 2-4 %. С этой целью в состав бетона вводятся воздухововлекающие добавки.

Для повышения морозостойкости бетона используются водоредуцирующие и гидрофобизирующие ПАВ.

Влияние водоредуцирующих ПАВ проявляется в пластификации бетонных смесей, что позволяет при сохранении необходимой подвижности снизить водоцементное отношение и, следовательно, повысить прочность и морозостойкость бетонов.

Влияние гидрофобизирующих ПАВ на морозостойкость проявляется в воздухововлечении или газообразовании в бетонной смеси. При этом происходит гидрофобизация стенок пор и капилляров. Образовавшиеся пузырьки воздуха создают в структуре бетона условно замкнутые поры, что приводит к повышению его морозостойкости.

Химические добавки, снижающие проницаемость бетонов, могут быть рекомендованы к использованию индивидуально или в составе комплексных для повышения коррозийной стойкости.

Механизм действия расширяющих добавок

При использовании расширяющих добавок необходимо учитывать состав цемента, тип и количество алюминатов, сульфата кальция и свободной извести в смеси, содержание воды, степени армирования конструкций и условия твердения.

Расширение цементной системы достигается в результате образования эттрингита при высокой концентрации извести, что создает условия для роста гидросульфоалюмината кальция, а также давления, возникающего при гидратации CaO с образованием $Ca(OH)_2$.

В бетонах, содержащих добавки на основе сульфоалюмината кальция или извести, использование заполнителей с высоким модулем упругости приводит к большему объему расширения.

Механизм действия противоморозных добавок

Твердение цементных бетонов замедляется при снижении температуры окружающей среды и практически прекращается при замерзании жидкой фазы. Поэтому для обеспечения их твердения в зимних условиях необходимо предотвращать замерзание воды в составе смесей, что может быть достигнуто либо сохранением положительной температуры бетона в период твердения до набора им критической прочности, либо снижением температуры замерзания жидкой фазы путем введения в его состав **противоморозных добавок**.

Применение данных добавок осуществляется, как правило, в производстве бетонов в построечных условиях, при возведении монолитных или сборно-монолитных бетонных и железобетонных сооружений, при изготовлении бетонных и железобетонных конструкций в условиях полигонов при установившейся среднесуточной температуре наружного воздуха и грунта не ниже 5 °С и минимальной суточной темпера туре ниже 0 °С.

В ранний период гидратации количество воды, вступающей в химическое взаимодействие с цементом, большая ее часть замерзает при температуре, близкой к 0 °С.

Коагуляционная структура цементной матрицы на этом этапе не способна воспринимать внутренние напряжения, связанные с процессами льдообразования, вследствие чего происходит ее разуплотнение и нарушение внутреннего сцепления между отдельными составляющими.

Бетон, подвергнутый замораживанию в раннем возрасте, при последующем оттаивании и твердении имеет разуплотненную структуру и характеризуется меньшими показателями прочности и долговечности.

При замерзании объем воды увеличивается и это вызывает в бетонной смеси или бетоне малой прочности образование ледяных прослоек и контактов между цементной матрицей, заполнителем и арматурой.

Многократное замораживание и оттаивание еще в большей степени нарушает структуру бетона и приводит к снижению прочности.

Предварительное выдерживание бетона при положительной температуре до набора им необходимой прочности снижает опасность негативного влияния отрицательных температур на прочность и долговечность бетонных и железобетонных конструкций.

Наиболее эффективными противоморозными добавками являются добавки-электролиты: поташ, нитрит натрия, хлорид кальция, нитрит и нитрат

кальция, хлорид натрия, нитрит-нитрат-хлорид кальция, их комплексы с мочевиной, а также модификаторы на основе формиатов и ацетатов натрия, кальция.

Механизм действия гидрофобизирующих добавок

Гидрофобизирующие добавки – вещества, придающие цементным бетонам водоотталкивающие свойства за счет гидрофобизации стенок пор и капилляров.

Гидрофобизаторы вводятся в бетонные смеси с целью:

- уменьшения смачивания стенок пор и капилляров, а также поверхности бетонных и железобетонных изделий;
- воздухововлечения или газообразования с гидрофобизацией образующихся пузырьков воздуха;
- повышения пластичности бетонных смесей за счет воздухововлечения.

Некоторые гидрофобизирующие добавки вызывают кольматацию пор и капилляров с уменьшением их сечения.

Механизмы действия минеральных добавок

Минеральной добавкой (МД) называется дисперсный неорганический материал природного или техногенного происхождения, вводимый в бетонную смесь в процессе ее приготовления в целях направленного регулирования технологических свойств и (или) строительно-технических свойств бетонов, и (или) придания им новых свойств.

В соответствии с ГОСТ Р 56592, **минеральная добавка природного происхождения** – МД, полученная путем измельчения, а при необходимости – дополнительной термической обработки природных (горных) пород различного происхождения.

Минеральная добавка техногенного происхождения – МД, полученная из отходов промышленных производств путем измельчения, осаждения или конденсации из газовой или жидкой фазы.

В зависимости от характера взаимодействия с продуктами гидратации цемента МД бывают: инертными, не способными к взаимодействию с продуктами гидратации и щелочами цемента, применяемые в качестве микронаполнителя, и активными, обладающими вяжущими, расширяющими или пуццоланическими свойствами.

Вяжущие свойства активной минеральной добавки (АМД) – способность АМД, затворенной водой, после схватывания на воздухе твердеть в водной среде и в бетоне.

Расширяющие свойства АМД – способность активной минеральной добавки, введенной в БС, компенсировать усадку или вызывать самонапряжение в твердеющем бетоне.

Пуццоланические свойства активной минеральной добавки –

способность АМД, введенной в бетонную смесь, в присутствии извести, образуемой при гидратации цемента, проявлять вяжущие свойства.

В большинстве случаев взаимодействие извести с активными минеральными добавками основано на том, что содержащийся в МД активный кремнезем (минерал опал $SiO_2 \cdot nH_2O$, некристаллический кремнезем $SiO_{2акт}$) связывает известь в присутствии воды (поэтому они называются еще и гидравлическими) в низкоосновные гидросиликаты кальция:

$$mCa(OH)_2 + SiO_{2акт} + nH_2O \rightarrow (0{,}8–1{,}5)CaO \cdot SiO_2 \cdot pH_2O. \qquad (5.2)$$

Стандартным методом (по ГОСТ Р 56593) оценки степени пуццоланической активности АМД является определение количества поглощенного CaO из насыщенного раствора гидроксида кальция одним граммом добавки при нагревании. Для этого в плоскодонную колбу вместимостью 5 л помещают 15-20 г $Ca(OH)_2$, наливают 2-2,5 л дистиллированной воды и плотно закрывают резиновой пробкой, в которую вставлена трубка со смесью Na(OH) и $Ca(OH)_2$. Раствор взбалтывают три раза в сутки.

Через 4 суток колбу вскрывают, отфильтровывают небольшое количество раствора, отбирают пипеткой 50 мл в коническую колбу и титруют раствором соляной кислоты.

Если результат титрования покажет, что раствор имеет концентрацию более 1,15 г CaO на 1 л, приступают к его фильтрованию. В противном случае раствор подвергают дальнейшему насыщению.

Для испытания отбирают 100 г пробы АМД и высушивают при температуре (105 ± 5) °С в сушильном шкафу до тех пор, пока разность между результатами двух взвешиваний будет не более 0,1 г.

От приготовленной пробы АМД отвешивают на аналитических весах навеску массой 1 г. Навеску помещают в сосуд из винилпласта или другого инертного к щелочам материала, заливают 100 мл насыщенного раствора гидроксида кальция. Сосуд плотно закрывают крышкой и выдерживают при температуре 85-90 °С в течение 8 ч.

Затем нагрев прекращают, а сосуд с испытуемой пробой оставляют на 15 ч для остывания до температуры (20 ± 2) °С.

Одновременно с испытанием пробы АМД проводят нагрев 100 мл насыщенного раствора гидроксида натрия.

По истечении 15 ч из каждого сосуда отбирают пипеткой 50 мл раствора в коническую колбу или стакан, добавляют 3 капли метилового оранжевого и титруют раствором соляной кислоты до появления розовой окраски.

По результатам испытаний определяют объем соляной кислоты V_1, используемый для титрования раствора гидроксида кальция с АМД при температуре 85-90 °С и объем соляной кислоты V_2 – для титрования насыщенного раствора $Ca(OH)_2$ без АМД при 85-90 °С.

Определяют также объем соляной кислоты V_0 для титрования 50 мл

насыщенного раствора $Ca(OH)_2$ при нормальной температуре (20 ± 2) °С.

Количество CaO, поглощенного 1 г АМД из насыщенного раствора гидроксида кальция, рассчитывается по формуле:

$$CaO = 1{,}4 \cdot 2\,[V_0(V_2 - V_1) / V_2], \qquad (5.3)$$

где 1,4 – титр 0,05 моль/л раствора соляной кислоты по Ca, мг/мл·г;

V_0 – объем соляной кислоты для титрования 50 мл насыщенного раствора $Ca(OH)_2$ без АМД при (20 ± 2) °С, мл;

V_1 – объем соляной кислоты для титрования 50 мл анализируемого раствора с АМД при 85-90 °С, мл;

V_2 – объем соляной кислоты для титрования 50 мл насыщенного раствора $Ca(OH)_2$ без АМД при 85-90 °С, мл.

За результат испытания принимают среднеарифметическое значение двух результатов определения количества CaO, поглощенного из насыщенного раствора гидроксида кальция одним граммом АМД, если расхождение результатов двух параллельных определений составляет не более 1 % среднего арифметического значения.

Распространенным сырьем для получения активных минеральных добавок являются **опал-кристобалитовые породы**, которые представляют собой равномерную природную смесь породообразующих компонентов – опалового или опал-кристобалитового кремнезема, глинистого и обломочного материала.

При этом под опаловым понимается реакционно-активный кремнезем $SiO_2 \cdot nH_2O$ (растворимый в слабых щелочах) аморфной морфологии, имеющий биогенную природу.

К опал-кристобалитовому кремнезему относится непрерывный ряд переходов от рентгеноаморфного опала через метастабильную фазу опал-кристобалита к неупорядоченному кристобалиту, а затем к α-кристобалиту и α-кварцу.

Опал-кристобалитовые породы подразделяются на две группы.

К первой группе относятся породы, состоящие из кремниевых скелетов микроорганизмов (панцирей диатомовых водорослей, радиолярий, спикул губок) или их обломков: диатомиты, спонголиты, радиоляриты, силикофлагеллиты.

Ко второй группе – породы химического осаждения, представленные бесструктурными, глобулярными частицами опала (опоки, трепелы).

Промышленный интерес среди них представляют диатомиты, опоки и трепелы, в меньшей степени – радиоляриты и силикофлагеллиты.

Диатомиты – это мягкие легкие тонкопористые породы белого или желтовато-серого, иногда серого и темно-серого цвета, состоящие более чем на 50 % из мельчайших (от 0,01 до 0,04 мм) опаловых панцирей (цельных или обломков) диатомей, пространственная структура которых сложена отдельными частями размером около 100 нм (рис. 5.4).

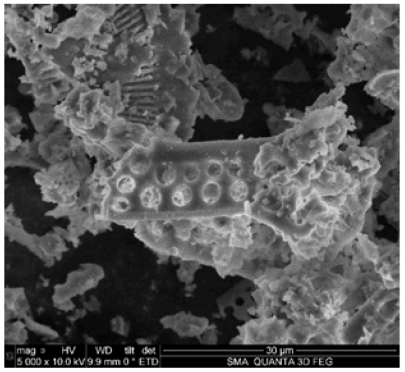
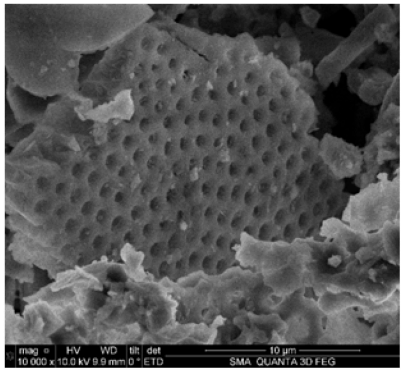
а)  б) 

Рис. 5.4. Диатомит при увеличении: а – в 5000 раз; б – в 10000 раз

В качестве примесей в диатомитах присутствуют обломочный материал (обычно кварц), глауконит, глинистые минералы. Средняя плотность диатомитов составляет от 250 до 800 кг/м^3 и увеличивается с возрастанием содержания обломочного и глинистого минерала, пористость достигает от 70 до 75 %, прочность – до 3,5 МПа.

Трепелы – рыхлые или слабо сцементированные тонкопористые породы, сложенные в основном мельчайшими (менее 0,005 мм) глобулярными частицами опал-кристобалитового кремнезема со светло-серой окраской (рис. 5.5). По внешнему виду напоминают диатомиты. Средняя плотность в зависимости от содержания обломочного материала колеблется от 700 до 1200 кг/м^3, пористость 50-70 %. Наблюдаются разности с существенным (до 15-20 % и более) содержанием цеолита.

Опоки – легкие плотные микропористые породы, сложенные в основном мельчайшими (менее 0,005 мм) частицами опал-кристобалитового кремнезема. В различном количестве присутствует обломочный (преимущественно кварцевый) и глинистый материал. Цвет от светло-серого, буровато-серого до темно-серого и даже черного.

По петрографическим признакам опоки делятся на следующие разновидности:

- **опоки «кремнистые»**, серые и темно-серые, крепкие, звонкие, с раковистым изломом; характеризуются наибольшей прочностью (до 150 МПа) и наибольшей средней плотностью (от 1400 до 1600 кг/м^3);
- **опоки «глинистые»**, серые и светло-серые, с полураковистым изломом, тонкопористые (гигроскопичные); средняя плотность их находится в пределах от 1200 до 1300 кг/м^3, прочность от 5 до 20 МПа;
- **опоки «карбонатные»**, светло-серые и желтовато-серые, выветрелые, плотные до мягких, слабые (трепеловидные), с землистым и полураковистым изломом; по внешнему виду представляют переходный тип породы между типичными опоками, и трепелами, средняя плотность их наименьшая от 1100 до 1300 кг/м^3, прочность от 3 до 7 МПа.

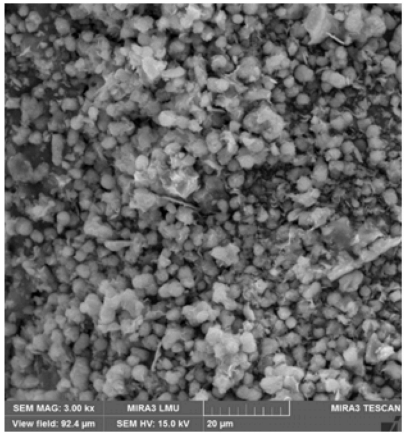
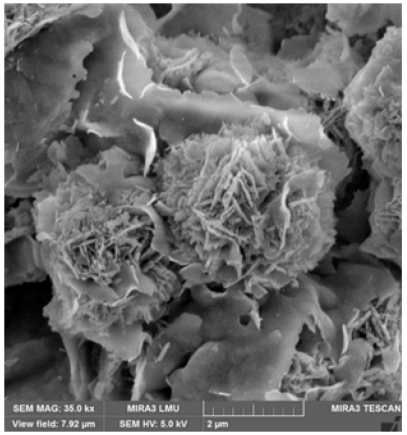
а)  б) 

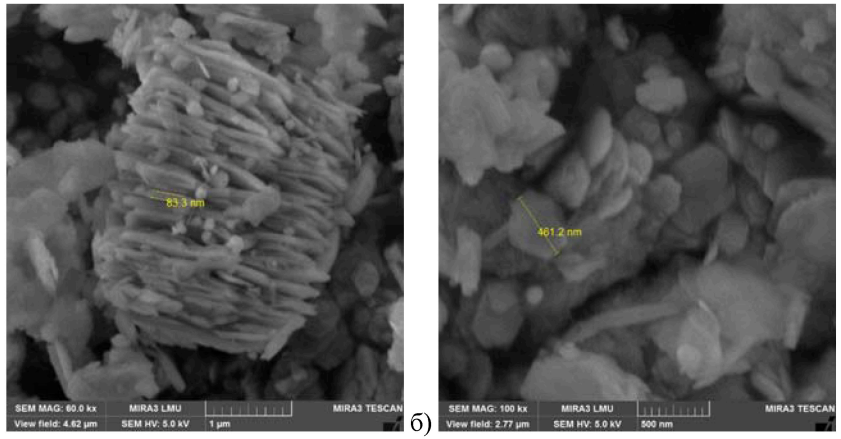
Рис. 5.5. Трепел при увеличении: а – в 3000 раз; б – в 35000 раз

Спонголиты – породы, состоящие более чем на 50 % из спикул кремневых губок (спонгий), представленных опал-кристобалитом, преобладающий их размер от 0,02 до 1 мм. Цементирующая масса – опал-кристобалитовая и кристобалит-халцедоновая. В различном количестве присутствуют остатки раковин радиолярий и фораминифер. Цвет от светло-серого до зеленовато- и буровато-серого. Обычно спонголиты представлены твердыми, уплотненными (напоминающими по внешнему виду опоки) разностями, среди которых нередко встречаются линзы, прослои и гнезда преимущественно из окатанных обломков спикул губок (спонгиевые пески). Средняя плотность спонголитов составляет 800-1500 кг/м^3, пористость 60-70 %.

Радиоляриты и силикофлагеллиты – породы, сложенные в основном скелетными остатками радиолярий (одноклеточных планктонных организмов, обитающих преимущественно в теплых океанических водах, скелет которых состоит из хитина и оксида кремния или сернокислого стронция) или силикофлагеллат (кремневых жгутиковых водорослей).

Промышленное использование диатомитов, трепелов и опок основано на их химическом составе и ряде физико-химических свойств (приложение 8), из которых главными являются наличие активного аморфного кремнезема, малая средняя плотность, высокая пористость, а также значительная термостойкость и химическая стойкость по отношению к кислотам. Эти уникальные свойства делают данные породы сырьем многоцелевого назначения.

В настоящее время востребованы алюмосиликатные АМД с использованием **метакаолина** (МКЛН) или кальцинированного каолина (рис. 5.6), получаемого путем обжига и помола каолинитовых глин и состоящего из аморфных реакционноспособных оксидов алюминия (Al_2O_3) и кремния (SiO_2).



а) б)

Рис. 5.6. Метакаолин при увеличении: а – в 60000 раз; б – в 100000 раз

После обжига каолинита $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ при температуре в интервале от 600 до 850 °С из него удаляется основная часть кристаллизационной воды, и образуется метакаолин ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$).

Известно, что МКЛН обладает высокой пуццоланической активностью (не менее 1000 мг CaO/г) – способностью взаимодействовать с $Ca(OH)_2$ в цементных системах с образованием кальциево-силикатного гидрогеля (CSH геля), а также гидратированной алюминатной фазы: гидроалюминатов (C_4AH_{13}, C_3AH_6), гидрогеленита (C_2ASH_8).

Непосредственное участие МКЛН в образовании продуктов гидратации цемента способствует снижению капиллярной пористости и увеличению количества гелевых пор, что сопровождается не только уплотнением и упрочнением, но и снижением проницаемости цементной матрицы по отношению к воде, солевым растворам, сульфатам, хлоридам, кислотам и щелочам.

Пуццоланическая активность метакаолина зависит от содержания в нем активных оксидов алюминия и кремния, дисперсности частиц МКЛН.

Метакаолин представлен как отдельными пластинчатыми гексагональными частицами длиной до 500 нм и более, так и столбчатыми пакетами пластинок толщиной менее 100 нм.

Виды АМД из техногенного сырья для цементных бетонов представлены в табл. 5.10.

Инертные минеральные добавки (ИМД) – тонкомолотые или тонкодисперсные природные материалы и побочные продукты промышленности, при обычной температуре не вступающие в реакции с цементными минералами и продуктами их гидратации. При определенных условиях, например при автоклавной обработке, эти добавки могут проявлять реакционную активность.

Таблица 5.10

Виды активных минеральных добавок из техногенного сырья

Вид	Химический и минералогический состав	Физические характеристики
Обладающие вяжущими свойствами: быстро охлажденные шлаки	В основном силикатное стекло (аморфный кремнезем), содержащее оксиды кальция, магния, алюминия. Кристаллические компоненты могут присутствовать в небольшом количестве	Представляют собой гранулы с шероховатой поверхностью, содержат 5-15 % влаги. Перед применением высушиваются и измельчаются до частиц размером менее 45 мкм. Удельная поверхность равна 350-500 $м^2$/кг
Обладающие вяжущими и пуццоланическими свойствами: высококальциевые золы уноса (CaO более 10 %)	В основном силикатное стекло (аморфный кремнезем), содержащее оксиды кальция, магния, алюминия. Кристаллические компоненты в виде кварца и C_3A могут присутствовать в небольшом количестве. Углерода обычно менее 2 %	Содержит 10-15 % частиц размером более 45 мкм. Большая часть частиц имеет сферическую форму с диаметром менее 20 мкм. Поверхность частиц в основном гладкая. Удельная поверхность составляет 300-400 $м^2$/кг
Обладающие высокой пуццоланической активностью: микрокремнезем	Состоит, в основном, из микрокремнезема некристаллической (аморфной) модификации	Порошок, состоящий из сферических частиц диаметром менее 0,5 мкм. Удельная поверхность составляет 20000 $м^2$/кг
золы рисовой шелухи	Состоят в основном из кремнезема аморфной модификации	Частицы размером менее 45 мкм, имеющие пористую поверхность. Удельная поверхность составляет 60000 $м^2$/кг
Обладающие нормальной пуццоланической активностью: низкокальциевые золы уноса (CaO менее 10 %)	В основном силикатное стекло (аморфный кремнезем), содержащее оксиды алюминия и железа. Кристаллические компоненты присутствуют в виде кварца, муллита, магнетита в небольшом количестве. Содержание углерода 5-10 %	Содержит 10-15 % частиц более 45 мкм. Большая часть частиц имеет сферическую форму с диаметром около 20 мкм. Удельная поверхность равна 250-350 $м^2$/кг
Прочие: медленно охлажденные шлаки золы гидроудаления, шлаки котелен	Содержат в основном кристаллические силикатные минералы и небольшое количество некристаллических компонентов	Дополнительно измельчаются для придания вяжущих или пуццолановых свойств. Измельченные частицы имеют шероховатую поверхность

Свойства ИМД зависят от их гранулометрического состава, определяющего удельную поверхность, прочности частиц, водопоглощения, объема удерживаемой адсорбционной воды, влияющего на технологические

свойства и удобоукладываемость бетонных смесей.

К ИМД природного происхождения относятся:

- **глинистые грунты** (тяжелая глина, суглинки, супесь) – горная обломочная порода, связанная глинистой связкой;

- **лессы** – богатые известью, бурые и светло-желтые рыхлые отложения известково-песчаной глины;

- **маршалит** – естественная кварцевая пудра, образовавшаяся в результате выветривания кварцсодержащих горных пород и состоящая в основном из мельчайших зерен кристаллического кварца;

- **глинистые, песчаные, кремнистые и доломитизированные известняки** – осадочные горные породы, состоящие из обломков раковин и панцирей различных микроорганизмов, из мелких кристаллических зерен кальцита и частично арагонита;

- **пески** – рыхлая смесь зерен крупностью до 5 мм, образовавшихся в результате выветривания твердых горных пород и состоящих в основном из кристаллического кварца;

- **песчаники** – осадочная горная порода, состоящая из сцементированных зерен кристаллического кварца;

- **известняки-ракушечники** – крупнопористая осадочная горная, сложенная из сцементированных известковых раковин.

ИМД техногенного происхождения являются:

- **колосниковая пыль** – пылевидные частицы железосодержащей руды, улавливаемые скрубберами из отходящих доменных газов и состоящие из оксидов Fe_2O_3, SiO_2, $A1_2O_3$;

- **молотая горелая порода** – тонкодисперсный материал, являющийся отходом добычи угля и содержащий в основном оксиды Fe_2O_3, SiO_2, $A1_2O_3$, CaO, MgO и др.

Тонкомолотые ИМД в цементных бетонах могут проявлять гидратационную активность. Количество ИМД определяется по показателям требуемой прочности бетона при возможной замене части цемента. Технологические эффекты при введении ИМД зависят от оптимального соотношения между вяжущим и добавкой, расхода цемента, вида и свойств добавки, водоцементного отношения и др.

Инертные минеральные добавки, вводимые в бетонные смеси совместно с суперпластификаторами, могут использоваться для повышения эффективности последних.

Контрольные вопросы

1. Что такое бетоны? По каким признакам они классифицируются?
2. Как различаются бетоны по основному назначению, виду вяжущего вещества и заполнителей?
3. Назовите виды бетонов по структуре, стойкости к коррозии, условиям твердения и скорости набора прочности.
4. Перечислите марки бетонов по средней плотности и морозостойкости.
5. Какие бетоны относятся к высокопрочным?
6. Что используется в качестве вяжущих веществ для тяжелых, мелкозернистых, легких и ячеистых бетонов?
7. Назовите виды цементов для бетонов, эксплуатируемых в агрессивных условиях, бетонов гидротехнических и транспортных сооружений.
8. Как различаются гипсобетоны по виду вяжущего вещества?
9. Дайте определение заполнителям для бетонов. Какова их классификация?
10. Охарактеризуйте виды и свойства природных плотных и искусственных пористых заполнителей.
11. Какие виды воды применяются для приготовления бетонных смесей, ухода за твердеющим бетоном и промывки заполнителей?
12. Что такое добавки для бетонов? Как они подразделяются в зависимости от основного эффекта действия?
13. В чем заключаются механизмы действия пластифицирующих, воздухововлекающих, пено- и газообразующих добавок?
14. Перечислите виды ускорителей и замедлителей твердения бетонов.
15. Каковы механизмы действия добавок, повышающих прочность, морозо- и коррозионную стойкость бетонов?
16. Что такое гидрофобизирующие, противоморозные и расширяющие добавки?
17. Дайте определения вяжущим, расширяющим и пуццоланическим свойствам активных минеральных добавок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алимов Л.А. Строительные материалы: учебник / Л.А. Алимов, В.В. Воронин. – Москва: Издательский центр «Академия», 2014. – 320 с.

2. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 528 с.

3. Высокоэффективные модифицированные бетоны: учебное пособие / Н.П. Лукутцова [и др.]. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – 176 с.

4. Дворкин Л.И. Бетоноведение: монография. В двух томах. Том 1. Цементный бетон / Л.И. Дворкин. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 692 с.

5. Дворкин Л.И. Бетоноведение: монография. В двух томах. Том 2. Основные разновидности бетонов / Л.И. Дворкин. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 608 с.

6. Дворкин Л.И. Строительное материаловедение: учебное пособие / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2013. – 832 с.

7. Дворкин Л.И. Строительные минеральные вяжущие материалы: учебное пособие / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2011. – 544 с.

8. Добшиц Л.М. Материалы на минеральной основе для защиты строительных конструкций от коррозии: учебное пособие / Л.М. Добшиц, Т.И. Ломоносова. – Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. – 80 с.

9. Дорожно-строительные материалы / И.М. Грушко [и др.]. – М.: Транспорт, 1991. – 357 с.

10. Загороднюк Л.Х. Производство строительных материалов, изделий и конструкций: учебное пособие / Л.Х. Загороднюк. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018. – 92 с.

11. Золотарев В.А. Дорожные битумные вяжущие и асфальтобетоны. Ч. 1. Дорожные битумные вяжущие: учебник / В.А. Золотарев. – Х.: ХНАДУ, 2014. – 180 с.

12. Золотарев В.А. Дорожные битумные вяжущие и асфальтобетоны Ч. 2. Дорожные асфальтобетоны: учебник / В.А. Золотарев. – Х.: ХНАДУ, 2016. – 204 с.

13. Касторных Л.И. Добавки в бетоны и строительные растворы: учебно-справочное пособие / Л.И. Касторных. – Ростов н/Д.: Феникс, 2007. – 221 с.

14. Ковалев Я.Н. Физико-химические основы технологии строительных материалов: учебно-методическое пособие / Я.Н. Ковалев. – Минск: Новое знание, 2016. – 285 с.

15. Логанина В.И. Архитектурно-дизайнерское материаловедение: учебное пособие / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына. – М.: Изд-во Юрайт, 2022. – 183 с.

16. Лукутцова Н.П. Дорожное материаловедение: учебное пособие / Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин, Е.Ю. Горностаева. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2023. – 189 с.

17. Лукутцова Н.П. Модифицирующие добавки для бетонов: учебное пособие / Н.П. Лукутцова. – Брянск: Изд-во БГИТА, 2009. – 124 с.

18. Лукутцова Н.П. Теоретические и технологические аспекты получения микро- и нанодисперсных добавок на основе шунгитосодержащих пород для бетона: монография / Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин. – Брянск: Изд-во БГИТА, 2014. – 216 с.

19. Мухаметов Р.Р. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов: учебное пособие / Р.Р. Мухаметов, А.П. Петрова. – Москва: ВИАМ, 2021. – 528 с.

20. Пшеничный Г.Н. Строительный гипс и портландцемент: учебное пособие / Г.Н. Пшеничный. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 384 с.

21. Пшеничный Г.Н. Теоретические основы направленной технологии цементных бетонов: монография / Г.Н. Пшеничный. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 356 с.

22. Руденская И.М. Органические вяжущие для дорожного строительства / И.М. Руденская, А.В. Руденский. – М.: Инфра-М, 2010. – 258 с.

23. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение в 2 ч. Часть 1: учебник / И.А. Рыбьев. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 275 с.

24. Семериков И.С. Физическая химия строительных материалов: учебное пособие / И.С. Семериков, Е.С. Герасимова. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 204 с.

25. Строкова В.В. Наносистемы в строительном материаловедении: учебное пособие / В.В. Строкова, И.В. Жерновский, А.В. Череватова. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 236 с.

26. Строительные материалы (Материаловедение. Технология конструкционных материалов): учебник / В.Г. Микульский [и др.]; под ред. В.Г. Микульского, Г.П. Сахарова. – Москва: Издательство АСВ, 2011. – 520 с.

27. Строительные материалы для эксплуатации в экстремальных условиях: учебное пособие / А.М. Гридчин [и др.]. – Москва: Издательство АСВ, 2008. – 537 с.

28. Тараканов О.В. Химические добавки в растворы и бетоны: монография / О.В. Тараканов, В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 168 с.

29. Технология бетона, строительных изделий и конструкций: учебник / Ю.М. Баженов [и др.]. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 480 с.

30. Усов Б.А. Химия и технология цемента: учебное пособие / Б.А. Усов. – Москва: ИНФРА-М, 2023. – 158 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Таблица П 1.1

Химический и минералогический состав клинкера сульфатостойкого портландцемента

В процентах от массы клинкера, не более

Наименование показателя	Тип портландцемента		
	ЦЕМ I СС	ЦЕМ II/А-Ш СС ЦЕМ II/В-Ш СС ЦЕМ II/А-П СС ЦЕМ II/А-К СС	ЦЕМ III/А СС
C_3A	3,5	5	7
($C_3A + C_4AF$)	Не нормируется		22
Al_2O_3	5	5	Не нормируется
MgO	5	5	5

Приложение 2

Марки дорожных битумных эмульсий в зависимости от вида, класса и модификации

1. ЭБДК Б – эмульсия битумная дорожная катионная быстрораспадающаяся;
2. ЭБДА Б – эмульсия битумная дорожная анионная быстрораспадающаяся;
3. ЭБПДК Б – эмульсия битумно-полимерная дорожная катионная быстрораспадающаяся;
4. ЭБПДА Б – эмульсия битумно-полимерная дорожная анионная быстрораспадающаяся;
5. ЭБДК С – эмульсия битумная дорожная катионная среднераспадающаяся;
6. ЭБДА С – эмульсия битумная дорожная анионная среднераспадающаяся;
7. ЭБПДК С – эмульсия битумно-полимерная дорожная катионная среднераспадающаяся;
8. ЭБПДА С – эмульсия битумно-полимерная дорожная анионная среднераспадающаяся;
9. ЭБДК М – эмульсия битумная дорожная катионная медленнораспадающаяся;
10. ЭБДА М – эмульсия битумная дорожная анионная медленнораспадающаяся;
11. ЭБПДК М – эмульсия битумно-полимерная дорожная катионная медленнораспадающаяся;
12. ЭБПДА М – эмульсия битумно-полимерная дорожная анионная медленнораспадающаяся.

Приложение 3

Таблица П 3.1

Виды бетонов по стойкости к коррозии

Индекс вида бетона	Индекс среды эксплуатации	Условия эксплуатации	Пример эксплуатации бетона
А	ХО	Без риска коррозионного воздействия (сухой режим эксплуатации)	
Б	ХС	Коррозия, вызванная карбонизацией	
	ХС1	Сухая и постоянно влажная среда	Конструкции помещений в жилых домах, за исключением кухонь, ванных комнат, прачечных, бетон постоянно под водой
	ХС2	Влажная и кратковременно сухая среда	Поверхности бетона, длительно смачиваемые водой, фундаменты
	ХС3	Умеренно влажная среда	Конструкции под частым или постоянным воздействием наружного воздуха без увлажнения атмосферными осадками
	ХС4	Попеременное увлажнение и высушивание	Наружные конструкции под воздействием дождя
В	XD	Коррозия, вызванная действием хлоридов (кроме морской воды)	
	XD1	Среда с умеренной влажностью	Конструкции под воздействием аэрозоля солей хлоридов
	XD2	Влажная и редко сухая среда	Плавательные бассейны, конструкции под воздействием промышленных сточных вод с содержанием хлоридов
	XD3	Попеременное увлажнение и высушивание	Конструкции мостов под воздействием растворов противогололедных реагентов, покрытия дорог, перекрытия парковок
	XS	Коррозия, вызванная действием морской воды	
	XS1	Воздействие аэрозолей	Береговые сооружения без прямого контакта с водой
	XS2	Под водой	Подводные части морских сооружений
	XS3	Зона прилива и отлива	Части морских сооружений в зоне попеременного уровня воды
Г	XF	Коррозия, вызванная попеременным замораживанием и оттаиванием	
	XF1	Умеренное водонасыщение без антиобледенителей	Вертикальные поверхности зданий и сооружений под воздействием дождя и мороза
	XF2	Умеренное водонасыщение с антиобледенителями	Вертикальные поверхности зданий и сооружений под воздействием растворов антиобледенителей и мороза
	XF3	Сильное водонасыщение без антиобледенителей	Сооружения под воздействием дождя и мороза
	XF4	Сильное насыщение растворами солей антиобледенителей или морской водой	Дорожные покрытия, обрабатываемые противогололедными реагентами, горизонтальные поверхности мостов и др.
Д	ХА	Химическая и биологическая коррозия	
	ХА1	Слабая степень агрессивности среды	Конструкции в подземных водах
	ХА2	Средняя степень агрессивности среды	Конструкции в контакте с морской водой
	ХА3	Сильная степень агрессивности среды	Водоочистные сооружения с химическими агрессивными стоками и др.

Приложение 4

Таблица П 4.1

Группы эффективности цементов при пропаривании

Группа эффективности	Тип цемента	Предел прочности при сжатии после тепловой обработки, МПа, для следующих классов		
		32,5	42,5	52,5
I	ЦЕМ 0	-	более 30	-
	ЦЕМ I	более 25,5	более 27	не менее 40
	ЦЕМ II/A	более 20	более 25	-
II	ЦЕМ II/B	более 18	более 20	-
	ЦЕМ III			

Таблица П 4.2

Виды цемента для бетонов в агрессивных средах

Индекс среды эксплуатации	Вид и тип цемента
Неагрессивная среда	
XO	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/B-Ш; ЦЕМ II/A-П; ЦЕМ II/A-З; ЦЕМ II/A-Г; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ II/A-И; ЦЕМ II/A-К; ЦЕМ III/A; ЦЕМ IV/A; ЦЕМ V/A; ЦЕМ I СС; ЦЕМ II/A-Ш СС; ЦЕМ II/A-П СС; ЦЕМ II/A-К (Ш-П) СС; ЦЕМ II/A-К (Ш-П, МК) СС; ЦЕМ III/A СС
Карбонизация	
XC1	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ II/A-И; ЦЕМ III/A; ЦЕМ I СС; ЦЕМ II/A-Ш СС; ЦЕМ III/A СС Допускаются: ЦЕМ II/B-Ш; ЦЕМ II/A-К; ЦЕМ IV/A; ЦЕМ V/A
XC2	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ I СС; ЦЕМ II/A-Ш СС Допускаются: ЦЕМ II/B-Ш; ЦЕМ II/A-И; ЦЕМ III/A; ЦЕМ III/A СС
XC3	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ I СС; ЦЕМ II/A-Ш СС Допускаются: ЦЕМ II/B-Ш; ЦЕМ II/A-И; ЦЕМ III/A; ЦЕМ II/A-П СС; ЦЕМ III/A СС
XC4	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ I СС; ЦЕМ II/A-Ш СС Допускаются: ЦЕМ II/B-Ш; ЦЕМ II/A-И; ЦЕМ III/A; ЦЕМ III/A СС
Хлоридная коррозия (морская вода)	
XS1	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/B-Ш; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ III/A; ЦЕМ I СС; ЦЕМ II/A-Ш СС; ЦЕМ III/A СС Допускаются: ЦЕМ II/A-И
XS2	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/B-Ш; ЦЕМ II/A-П; ЦЕМ II/A-З; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ III/A; ЦЕМ IV/A; ЦЕМ I СС; ЦЕМ II/A-Ш СС; ЦЕМ II/A-П СС; ЦЕМ II/A-К (Ш-П) СС; ЦЕМ II/A-К (Ш-П, МК) СС; ЦЕМ III/A СС Допускаются: ЦЕМ II/A-И
XS3	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ III/A;

Продолжение таблицы П 4.2

Индекс среды эксплуатации	Вид и тип цемента
	ЦЕМ I СС; ЦЕМ II/A-Ш СС; ЦЕМ III/A СС
Хлоридная коррозия (прочие хлоридные воздействия)	
XD1	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ III/A; ЦЕМ I СС; ЦЕМ II/A-Ш СС; ЦЕМ III/A СС Допускаются: ЦЕМ II/B-Ш; ЦЕМ II/A-И; ЦЕМ IV/A; ЦЕМ V/A; ЦЕМ II/A-П СС
XD2	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ III/A; ЦЕМ I СС; ЦЕМ II/A-Ш СС; ЦЕМ III/A СС Допускаются: ЦЕМ II/B-Ш; ЦЕМ II/A-И
XD3	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ III/A; ЦЕМ I СС Допускаются: ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/A-И; ЦЕМ II/A-Ш СС
Замораживание и оттаивание	
XF1	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ I СС Допускаются: ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/B-Ш; ЦЕМ II/A-И; ЦЕМ III/A; ЦЕМ II/A-Ш СС; ЦЕМ III/A СС
XF2, XF3, XF4	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ I СС Допускаются: ЦЕМ II/A-МК
Химическая коррозия	
XA1	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/B-Ш; ЦЕМ II/A-П; ЦЕМ II/A-З; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ II/A-И; ЦЕМ I СС; ЦЕМ II/A-Ш СС; ЦЕМ II/A-П СС; ЦЕМ II/A-К (Ш-П) СС; ЦЕМ II/A-К (Ш-П, МК) СС; ЦЕМ III/A СС Допускаются: ЦЕМ III/A
XA2	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/B-Ш; ЦЕМ II/A-П; ЦЕМ II/A-З; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ I СС; ЦЕМ II/A-Ш СС; ЦЕМ II/A-П СС; ЦЕМ II/A-К (Ш-П) СС; ЦЕМ II/A-К (Ш-П, МК) СС; ЦЕМ III/A СС Допускаются: ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ II/A-И; ЦЕМ III/A
XA3	Рекомендуются: ЦЕМ I; ЦЕМ II/B-Ш; ЦЕМ II/A-П; ЦЕМ II/A-З; ЦЕМ II/A-МК; ЦЕМ I СС; ЦЕМ II/A-Ш СС; ЦЕМ II/A-П СС; ЦЕМ II/A-К (Ш-П) СС; ЦЕМ II/A-К (Ш-П, МК) СС; ЦЕМ III/A СС Допускаются: ЦЕМ II/A-Ш; ЦЕМ III/A

Приложение 5

Таблица П 5.1

Группы щебня в зависимости от содержания зерен пластинчатой и игловатой формы

Группа	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, % по массе
1	до 10
2	10-15
3	15-25
4	25-35
5	35-50

Таблица П 5.2

Марки по дробимости щебня из осадочных и метаморфических пород

Марка	Потеря массы при испытании щебня, %	
	в сухом состоянии	в насыщенном водой состоянии
1200	до 11	до 11
1000	11-13	11-13
800	13-15	13-15
600	15-19	15-20
400	19-24	20-28
300	24-28	28-38
200	28-35	38-54

Таблица П 5.3

Марки по дробимости щебня из изверженных пород

Марка	Потеря массы при испытании щебня, %	
	из интрузивных пород	из эффузивных пород
1400	до 12	до 9
1200	12-16	9-11
1000	16-20	11-13
800	20-25	13-15
600	25-34	15-20

Таблица П 5.4

Марки по дробимости щебня из гравия и гравия

Марка	Потеря массы при испытании, %	
	щебня из гравия	гравия
1000	до 10	до 8
800	10-14	8-12
600	14-18	12-16
400	18-26	16-24

Таблица П 5.5

Марки по истираемости щебня и гравия

Марка	Потеря массы при испытании, %	
	щебня	гравия
И1	до 25	до 20
И2	25-35	20-30
И3	35-45	30-40
И4	45-60	40-50

Таблица П 5.6

Содержание зерен слабых пород в щебне и гравии

Вид породы и марка по дробимости щебня и гравия	Содержание зерен слабых пород, % по массе
Щебень из изверженных, метаморфических и осадочных горных пород	
1400, 1200, 1000	5
800, 600, 400	10
300	15
Щебень из гравия и валунов и гравий	
1000, 800, 600	10
400	15

Таблица П 5.7

Показатели морозостойкости щебня и гравия

Вид испытания	Марка по морозостойкости щебня и гравия							
	F15	F25	F50	F100	F150	F200	F300	F400
Замораживание – оттаивание								
Число циклов	15	25	50	100	150	200	300	400
Потеря массы после испытания, %, не более	10	10	5	5	5	5	5	5
Насыщение в растворе сульфата натрия – высушивание								
Число циклов	3	5	10	10	15	15	15	15
Потеря массы после испытания, %, не более	10	10	10	5	5	3	2	1

Таблица П 5.8

Содержание пылевидных и глинистых частиц в щебне и гравии

Вид породы и марка по дробимости щебня и гравия	Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе, не более
Щебень из изверженных и метаморфических пород	
свыше 800	1
600 – 800	1
Щебень из осадочных пород	
600 – 1200	2
200, 400	3
Щебень из гравия и гравий	
1000	1
800	1
600	2
400	3
Щебень из валунов	
1200	1
1000	1
800	1
600	2
400	3

Таблица П 5.9

Содержание глины в комках в щебне и гравии

Марка по дробимости щебня и гравия	Содержание глины в комках, % по массе, не более
Щебень из изверженных, осадочных и метаморфических пород	
400 и выше	0,25
300, 200	0,5
Щебень из гравия и гравий	
1000, 800, 600, 400	0,25
Щебень из валунов	
1200, 1000, 800, 600	0,25

Таблица П 5.10

Устойчивость структуры щебня против всех видов распадов

Марка по дробимости щебня	Потери массы при распаде, %, не более
1000 и выше	3
800, 600	5
400 и ниже	7

Щебень и гравий применяют в бетоне без ограничений, если содержание пород и минералов, относимых к вредным компонентам, составляет не более:

- 50 ммоль/л аморфных разновидностей диоксида кремния, растворимых в щелочах;
- 1,5 % по массе сульфатов (гипс, ангидрит) и сульфидов, кроме пирита (марказит, пирротин, гипс, ангидрит и др.) и пересчете на SO_3;
- 4 % по массе пирита;
- 15 % по объему слоистых силикатов, если слюды, гидрослюды, хлориты и другие являются породообразующими минералами;
- 0,1 % по массе галоидных соединений (галит, сильвин и др., включая водорастворимые хлориды) в пересчете на ион хлора;
- 0,25 % по массе свободных волокон асбеста;
- 1 % по массе угля и древесных остатков;
- 10 % по объему каждого из перечисленных породообразующих минералов (магнетита, гетита, гематита, апатита, нефелина, фосфорита и др.) или их суммы в количестве не более 15 %.

Приложение 6

Таблица П 6.1

Классы и группы песка в зависимости от зернового состава

Класс	Группа	Содержание зерен крупностью, % по массе		
		свыше 10 мм	свыше 5 мм	менее 0,16 мм
I	Повышенной крупности, крупный и средний	0,5	5	5
	Мелкий	0,5	5	10
II	Повышенной крупности	5	20	10
	Крупный и средний	5	15	15
	Мелкий и очень мелкий	0,5	10	20
	Тонкий и очень тонкий	не допускается		не нормируется

Таблица П 6.2

Классы и группы песка в зависимости от содержания пылевидных и глинистых частиц, глины в комках

Класс	Группа	Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе	Содержание глины в комках, % по массе
I	Повышенной крупности, крупный и средний	2	0,25
	Мелкий	3	0,35
II	Повышенной крупности, крупный и средний	3	0,5
	Мелкий и очень мелкий	5	0,5
	Тонкий и очень тонкий	10	1

Допустимое содержание пород и минералов, относимых к вредным компонентам и примесям, в песке не должно превышать следующих значений:

- аморфные разновидности диоксида кремния, растворимого в щелочах (халцедон, опал, кремень и др.) – не более 50 ммоль/л;
- сера, сульфиды, кроме пирита (марказит, пирротин и др.), и сульфаты (гипс, ангидрит и др.) в пересчете на SO_3 – не более 1 %;
- пирит в пересчете на SO_3 – не более 4 % по массе;
- слюда – не более 2 % по массе;
- галоидные соединения (галит, сильвин и др.), включающие в себя водорастворимые хлориды, в пересчете на ион хлора – не более 0,15 % по массе;
- уголь – не более 1 % по массе;
- органические примеси (гумусовые кислоты) – менее количества, придающего раствору гидроксида натрия (колориметрическая проба) окраску, соответствующую цвету эталона или темнее этого цвета.

Приложение 7

Таблица П 7.1

Марки искусственных пористых заполнителей (гравия, щебня и песка) по насыпной плотности

Марка	Насыпная плотность, кг/м^3
М150	100-150
М200	150-200
М250	200-250
М300	250-300
М350	300-350
М400	350-400
М450	400-450
М500	450-500
М600	500-600
М700	600-700
М800	700-800
М900	800-900
М1000	900-1000
М1100	1000-1100
М1200	1100-1200

Таблица П 7.2

Минимальная и максимальная марки по насыпной плотности искусственных пористых заполнителей (гравия, щебня и песка)

Наименование заполнителя	Марка по насыпной плотности	
	минимальная	максимальная
Керамзитовые гравий и щебень	М150	М800
Шунгизитовый гравий	М300	М800
Аглопоритовый гравий	М400	М900
Аглопоритовый щебень	М400	М900
Шлакопемзовый щебень	М300	М800
Керамзитовый и шунгизитовый песок	М250	М1000
Аглопоритовый песок	М600	М1100
Шлакопемзовый песок	М600	М1200

Таблица П 7.3

Марки по прочности искусственных пористых заполнителей (гравия и щебня)

Марка	Прочность, МПа				
	керамзитового и шунгизитового гравия	керамзитового щебня	аглопоритового гравия	аглопоритового щебня	шлакопемзового щебня
П15	до 0,5	-	-	до 0,3	до 0,2
П25	0,5-0,7	-	-	0,3-0,4	0,2-0,3
П35	0,1-1	0,5-0,6	-	0,4-0,5	0,3-0,4
П50	1-1,5	0,6-0,8	0,7-1	0,5-0,6	0,4-0,5
П75	1,5-2	0,8-1,2	1-1,2	0,6-0,7	0,5-0,6
П100	2-2,5	1,2-1,6	1,2-1,5	0,7-0,8	0,6-0,8
П125	2,5-3,3	1,6-2	1,5-1,7	0,8-0,9	0,8-1,1
П150	3,3-4,5	2-3	1,7-2	0,9-1	1,1-1,4
П200	4,5-5,5	3-4	2-2,5	1-1,2	1,4-1,8
П250	5,5-6,5	4-5	2,5-3	1,2-1,4	1,8-2,2
П300	6,5-8	5-6	3-3,5	1,4-1,6	2,2-2,7
П350	8-10	6-7	более 3,5	более 1,6	более 2,7
П400	более 10	7-8	-	-	-

Таблица П 7.4

Соотношение между характеристиками насыпной плотности и прочности искусственных пористых заполнителей (гравия и щебня)

Насыпная плотность, кг/м^3	Марка по насыпной плотности	Прочность, МПа	Марка по прочности, не менее
Керамзитовый гравий			
100-150	М150	до 0,5	П15
150-200	М200	до 0,5	П15
200-250	М250	0,5-0,7	П25
250-300	М300	0,7-1	П35
300-350	М350	1-1,5	П50
350-400	М400	1-1,5	П50
400-450	М450	1,5-2	П75
450-500	М500	2-2,5	П100
500-600	М600	2,5-3,3	П125
600-700	М700	3,3-4,5	П150
700-800	М800	4,5-5,5	П200
800-900	М900	5,5-6,5	П250
900-1000	М1000	6,5-8	П300

Продолжение таблицы П 7.4

Насыпная плотность, кг/м^3	Марка по насыпной плотности	Прочность, МПа	Марка по прочности, не менее
Керамзитовый щебень			
100-150	М150	до 0,5	П15
150-200	М200	до 0,5	П15
200-250	М250	до 0,5	П15
250-300	М300	0,5-0,6	П35
300-350	М350	0,6-0,8	П50
350-400	М400	0,6-0,8	П50
400-450	М450	0,8-1,2	П75
450-500	М500	1,2-1,6	П100
500-600	М600	1,6-2	П125
600-700	М700	2-3	П150
700-800	М800	3-4	П200
800-900	М900	4-5	П250
900-1000	М1000	5-6	П300
Шунгизитовый гравий			
250-300	М300	0,5-0,7	П25
300-350	М350	0,7-1	П35
350-400	М400	0,7-1	П35
400-450	М450	1-1,5	П50
450-500	М500	1-1,5	П50
500-600	М600	1,5-2	П75
600-700	М700	2-2,5	П100
700-800	М800	3,3-4,5	П150
800-900	М900	4,5-5,5	П200
900-1000	М1000	5,5-6,5	П250
Аглопоритовый гравий			
350-400	М400	до 0,5	П25
400-450	М450	0,5-0,7	П35
450-500	М500	0,7-1	П50
500-600	М600	1,2-1,5	П100
600-700	М700	1,7-2	П150
700-800	М800	2,5-3	П250
800-900	М900	3-3,5	П300
900-1000	М1000	3,5-8	П350
Аглопоритовый щебень			
350-400	М400	0,3-0,4	П25
400-450	М450	0,4-0,5	П35
450-500	М500	0,5-0,6	П50
500-600	М600	0,6-0,7	П75
600-700	М700	0,7-0,8	П100
700-800	М800	0,9-1	П150
800-900	М900	1-1,2	П200

Продолжение таблицы П 7.4

Насыпная плотность, кг/м^3	Марка по насыпной плотности	Прочность, МПа	Марка по прочности, не менее
Шлакопемзовый щебень			
250-300	М300	0,2-0,3	П25
300-350	М350	0,3-0,4	П35
350-400	М400	0,3-0,4	П35
400-450	М450	0,4-0,5	П50
450-500	М500	0,4-0,5	П50
500-600	М600	0,5-0,6	П75
600-700	М700	0,6-0,8	П100
700-800	М800	0,8-1,1	П125
800-900	М900	1,4-1,8	П200
900-1000	М1000	1,8-2,2	П250
1000-1100	М1100	2,2-2,7	П300
1100-1200	М1200	более 2,7	П350

Приложение 8

Таблица П 8.1

Химический состав и свойства опал-кристобалитовых пород

Показатель	Наименование породы		
	Диатомит	Трепел	Опока
Химический состав, %			
SiO_2	62,2-93,6	66,2-84,7	62,3-89,8
Al_2O_3	2,1-21,8	2,7-18,6	3,2-16,5
Fe_2O_3 + FeO	0,4-6,7	0,2-5,6	1-7,6
CaO	0,2-6,8	0,24-22,1	0,1-22,8
MgO	0,04-2,4	0,1-1,8	0,03-5,6
$SO_{3общ}$	0,1-1,9	0,01-1,6	0-0,55
K_2O	0,1-1,45	0,4-1,5	0,6-3,08
Na_2O	0,16-1,8	0,12-0,9	0,02-1,79
SiO_2 (растворимый в 5 % KOH)	58,8-89	12,2-84,6	12-76
Потери при прокаливании	2,6-13	1,8-22,6	1,7-17,6
Средняя плотность, кг/м^3	250-800	700-1200	1100-1600
Истинная плотность, кг/м^3	2000-2600	2200-2500	2000-2200
Пористость, %	70-75	50-70	30-55
Удельная поверхность, м^2/г	20-50	60-90	100-110
Прочность при сжатии, МПа	0,5-3,5	0,3-3,5	3-150
Твердость по шкале Мооса	1-3	-	3-6
Пластичность	средне-пластичные	пластичные	не пластичные
Физическое состояние	мягкие	рыхлые	окремнелые, нормальные, мягкие

Учебное издание

Лукутцова Наталья Петровна
Пыкин Алексей Алексеевич
Горностаева Елена Юрьевна
Васюнина Светлана Владимировна
Карпиков Евгений Геннадиевич

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ЧАСТЬ 1

Учебное пособие

ISBN 978-5-907857-68-1



Компьютерная верстка и макет *Горохов А.А.*

Подписано в печать 21.03.2024. Формат 60×84 1/16.
Бумага офисная. Цифровая печать.
Уч.-изд. л. 12,6. Усл. печ. л. 11,4. Тираж 500 экз. Заказ № 2218

Отпечатано в типографии
Закрытое акционерное общество «Университетская книга»
305018, г. Курск, ул. Монтажников, д.12
ИНН 4632047762 ОРГН 1044637037829 дата регистрации 23.11.2004 г.
Телефон +7-910-730-82-83 www.nauka46.ru