

Федеральное агентство по образованию  
Тверской государственный технический университет

В.В. Белов, В.Б. Петропавловская

**КРАТКИЙ КУРС МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ  
И ТЕХНОЛОГИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА**

Учебное пособие

Издание второе

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области строительства в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению 653500 «Строительство».

Тверь 2005

УДК 691: 519.6.502 (075)

ББК 30.3я7 + 38.3я7

**Белов В.В., Петропавловская В.Б.** Краткий курс материаловедения и технологии конструкционных материалов для строительства: Учебное пособие. – 2-е изд. – Тверь: ТГТУ, 2005. – 180 с.

Рассматриваются важнейшие группы строительных материалов универсального и специального назначения и основы технологии конструкционных материалов для строительства. Особое внимание уделено общим закономерностям связи структуры и свойств строительных материалов и изделий в рамках развиваемого в настоящее время научного строительного материаловедения (НСМ), а также целенаправленному созданию строительных материалов, изделий и конструкций с заданными структурой и свойствами в результате использования оптимальных технологических процессов. Рассматриваются перспективы развития строительных материалов с точки зрения использования техногенных отходов или вторичных ресурсов, а также местного сырья при их получении, снижения энергоемкости и повышения качества.

Учебное пособие предназначено для студентов строительных специальностей, преподавателей, специалистов строительного профиля.

Под общей редакцией доктора технических наук профессора В.В. Белова.

**Рецензенты:** кафедра «Строительство, строительные материалы и конструкции» ТулГУ (зав. кафедрой, советник РААСН д.т.н. проф. А.А. Трещев; зав. кафедрой «Строительные материалы» МГСУ д.т.н. проф. В.В. Козлов; д.т.н. проф. кафедры «Строительные материалы» Санкт-Петербургского ГАСУ Ю.Г. Мещеряков.

**ISBN 5-7995-0295-7**

© В.В. Белов, В.Б. Петропавловская, 2005

© Тверской государственный  
технический университет, 2005

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие составлено в соответствии с учебными программами подготовки студентов строительных специальностей вузов по курсу «Материаловедение. Технология конструкционных материалов». Данный курс является базисным для изучения других специальных дисциплин: строительные конструкции, технология строительного производства, архитектура и других. Поэтому овладение знаниями по этому курсу служит залогом успешной профессиональной подготовки специалистов строительного профиля. В то же время решение указанной проблемы встречает определенные трудности в связи с большим объемом сведений по данной дисциплине и обширностью соответствующих учебников, их недостаточным количеством; особенно вследствие многочисленных изменений в нормативных документах, появления новых научно-технических разработок в области строительных материалов и изделий.

Целью настоящего учебного пособия является сжатое систематизированное представление основных сведений преимущественно материаловедческого плана на современном научном и в то же время доступном для студентов уровне. В связи с возрастающим значением транспортного строительства значительное внимание в пособии уделено такому важнейшему дорожно-строительному материалу, как асфальтобетон, а также битумным вяжущим. Рассматриваются перспективы развития строительных материалов с точки зрения использования техногенных отходов или вторичных ресурсов, а также местного сырья при их получении, снижения энергоемкости и повышения качества продукции.

Данные о технологических процессах приведены в минимально необходимом объеме. Достижение сжатости представляемого материала потребовало отказа от использования большого объема иллюстративного материала. Поэтому данное пособие является не альтернативой существующим учебникам по курсам: «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» и «Строительные материалы», а их, по глубокому убеждению авторов, полезным и необходимым дополнением.

Авторы выражают искреннюю признательность заведующему кафедрой «Строительные материалы» Московского государственного строительного университета доктору технических наук профессору В.В. Козлову; заведующему кафедрой «Строительство, строительные материалы и конструкции» Тульского государственного университета, советнику РААСН, доктору технических наук профессору А.А. Трещеву; доктору технических наук профессору кафедры «Строительные материалы» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Ю.Г. Мещерякову за полезные замечания по содержанию пособия.

## ВВЕДЕНИЕ

**Общие сведения.** Строительное материаловедение является наукой о строительных материалах и изделиях. Без достаточных знаний о многочисленных разновидностях строительных материалов, способах их производства и качественных показателях, методах их правильного хранения и использования невозможно проектировать и строить здания и сооружения, реконструировать или ремонтировать их, выполнять научно-технические разработки в области строительства.

Строительные материалы – это основа строительства. В общих сметах строительных объектов на стоимость материалов обычно приходится 50-65 %, поэтому экономия при строительстве объекта во многом зависит от эффективности применения строительных материалов и изделий и правильного их выбора. Использование строительных материалов должно базироваться на прочных знаниях о производстве, показателях качества, методах проверки основных свойств материалов в лабораторных и производственных условиях, их эффективных областях применения. Успехи практики производства и применения строительных материалов во многом зависят от того, в какой мере она учитывает научные положения взаимосвязи состава и структуры (строения) материалов с их свойствами, а также, насколько уровень технологии и качественных показателей соответствует мировым достижениям в данной отрасли.

Наука и производство строительных материалов имеют глубочайшую историю развития. Возникновение науки и каждый этап ее развития всегда были обусловлены производством. В свою очередь, развитие производства являлось следствием возрастающих потребностей в материалах для строительства у общества.

**Классификация строительных материалов.** Исходя из условий работы материалов в сооружении, их можно разделить на две группы:

1. *Конструкционные материалы универсального типа:* а) природные каменные материалы; б) искусственные каменные материалы обжиговые (керамика, стекло, ситаллы) и безобжиговые на основе вяжущих веществ (бетон, железобетон, строительные растворы); в) металлы (сталь, чугун, алюминий, сплавы); г) полимеры; д) древесные материалы.

2. *Строительные материалы специального назначения,* необходимые для защиты конструкций от вредных воздействий среды, а также для повышения эксплуатационных свойств и создания комфорта: а) теплоизоляционные; б) акустические; в) гидроизоляционные; г) отделочные; д) антикоррозийные и др.

**Техническое регулирование и стандартизация строительных материалов и изделий.** В соответствии с законом РФ «О техническом регулировании», вступившим в действие с 1 июля 2003 года, правовое регули-

рование отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции, а также регулирование отношений в области оценки соответствия обеспечивается *техническим регулированием*. Основным нормативным документом в области технического регулирования, имеющим силу закона, является технический регламент.

**Технический регламент** – нормативный документ, устанавливающий обязательные для применения и исполнения требования к продукции, процессам производства, эксплуатации и другим объектам технического регулирования и принимаемый в целях безопасности граждан, имущества, окружающей среды, животных и растений.

**Стандартизация** – это установление и применение правил с целью упорядочения деятельности в определенной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон при соблюдении условий эксплуатации и требований безопасности. Результатом работы по стандартизации является принятие стандарта.

**Стандарт** – это нормативный документ, в котором устанавливают характеристики продукции, правила осуществления и характеристики процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, работ или оказания услуг, а также требования к терминологии, символике, упаковке, маркировке.

Национальную систему стандартизации составляют:

- *национальные стандарты*, к которым в России относят государственные стандарты (ГОСТ Р), и межгосударственные стандарты стран СНГ (ГОСТ), введенные в действие до 1 июля 2003 г.;
- *правила стандартизации, нормы и рекомендации* в области стандартизации;
- *стандарты организаций*;
- *общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации*.

При разработке национальных стандартов как основу используют международные стандарты ИСО (международной организации по стандартизации), МЭК (международной электротехнической комиссии) и др., за исключением случаев, когда такое применение признано по тем или иным причинам невозможным.

Большинство стандартов на строительные изделия и материалы – это стандарты технических требований и стандарты на методы испытаний. Стандарты технических требований нормируют показатели качества, надежности и долговечности продукции, ее внешний вид.

Кроме стандартов в строительстве действует система нормативных документов, объединяемая в «**Строительные нормы и правила**» (СНиП) и «**Свод правил**» (СП), которые представляют собой свод норм и правил по проектированию, строительству и производству строительных материалов, изделий и конструкций, а также зданий и сооружений.

Для повышения качества продукции, конкурентоспособности продукции, работ и услуг на российском и международном рынках осуществляется *удостоверение соответствия* продукции, процессов производства и иных объектов технического регулирования техническим регламентам, стандартам и условиям договора.

*Добровольное подтверждение соответствия* осуществляется в форме **добровольной сертификации** – установления соответствия национальным стандартам, стандартам организаций и условиям договора.

*Обязательное подтверждение соответствия* осуществляется в формах **декларирования о соответствии** и **обязательной сертификации** – установления соответствия техническим регламентам.

При проектировании, изготовлении строительных изделий и конструкций, возведении сооружений пользуются **единой модульной координацией размеров в строительстве (МКРС)** на базе основного модуля, равного 100 мм (1М). На практике используют как укрупненные модули (60М, 30М и др.) – при проектировании зданий, так и дробные (1/2М, 1/5М, 1/10М и др.) – при изготовлении строительных элементов.

## 1. ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

### 1.1. Состав строительных материалов

Строительные материалы характеризуются химическим, минеральным и фазовым составами.

**Химический состав строительных материалов** определяет деление их на органические (древесные, битум, пластмассы и т.п.), минеральные (бетон, цемент, кирпич, природный камень и т.п.) и металлы (сталь, чугун, алюминий). Химический состав позволяет судить о других технических характеристиках (биостойкость, прочность и т.п.). Химический состав некоторых материалов (неорганические вяжущие, каменные материалы) часто выражают количеством содержащихся в них оксидов. Оксиды, химически связанные между собой, образуют минералы, которые определяют минеральный состав материала.

**Минеральный состав** показывает, какие минералы и в каком количестве содержатся в материале. Этот состав непосредственно определяет свойства материала. Например, большее содержание в портландцементе такого минерала, как алит, ускоряет твердение, повышает прочность цементного камня.

**Фазовый состав** (по агрегатному состоянию) пористого материала характеризует количество твердого вещества (твердой фазы), образующего стенки пор («каркас» материала), и пор, заполненных воздухом (газовой фазой) и (или) водой (жидкой фазой). Соотношение между указанными фазами определяет баланс внутренних сил взаимодействия структурных элементов и во многом свойства материала.

## 1.2. Структура строительных материалов

Под *структурой* или *строением* материалов как физических тел понимают пространственное расположение частиц разной степени дисперсности и других структурных элементов с совокупностью устойчивых взаимных связей и порядком сцепления их между собой. Кроме того, в понятие структуры входит расположение пор, капилляров, поверхностей раздела фаз, микротрещин и других элементов. В зависимости от уровня изучения структуры выделяют макро- и микроструктуру, а также внутреннее строение вещества, составляющее материал на молекулярном уровне.

**Макроструктура** материала – строение, видимое невооруженным глазом или при небольшом увеличении. Различают следующие *типы макроструктуры*.

*Плотную однородную* структуру имеют металлы, стекло и т.п.

*Конгломератное* строение характерно для большинства природных и искусственных каменных материалов (различных видов бетона, растворов, силикатного кирпича, некоторых видов керамических материалов), когда отдельные зерна заполнителя прочно соединены между собой прослойками вяжущего вещества. При этом в зависимости от относительного содержания этих основных элементов твердой фазы материала различают порфировый, контактный и законттактный типы структур. *Порфировой* принято называть структуру, в которой зерна заполнителя разделены толстыми прослойками вяжущего, и для них характерно «плавающее» расположение в материале. Если зерна или частицы контактируют через тонкие прослойки вяжущего при сохранении ее непрерывности и сплошности, то такую структуру называют *контактной*. При непосредственном контакте дискретных элементов, когда вяжущего вещества недостаточно для сохранения своей непрерывности и сплошности, говорят о *законттактной* структуре.

Большинство строительных материалов имеют в своей структуре поры. *Мелкопористая* структура характерна для керамических фаянсовых материалов, пеностекла, а также некоторых бетонов с поризованным цементным камнем.

*Ячеистая* структура характеризуется наличием макропор в материале, свойственна газо- и пенобетонам, ячеистым пластмассам.

*Волокнистую* и *слоистую* структуры имеют материалы, у которых волокна (слои) расположены параллельно одно другому. Такая структура присуща древесине, изделиям из минеральной ваты.

*Рыхлозернистую* структуру образуют отдельные, не связанные одно с другим зерна (песок, гравий, порошкообразные материалы).

**Микроструктура** материала – строение, видимое в оптический микроскоп. На *микроуровне* твердая фаза материала может быть *кристаллической* и *аморфной*. Неодинаковое строение кристаллических и аморфных

веществ определяет и различие в их свойствах. Аморфные обладают не растроченной внутренней энергией кристаллизации, химически более активны, чем кристаллические того же состава (аморфные формы кремнезема – пемза, туфы, трепелы, диатомиты). Теплопроводность аморфных материалов ниже, чем кристаллических. Неодинаковые свойства могут наблюдаться у кристаллических материалов одного и того же состава, если они формируются в разных кристаллических формах, называемых модификациями. Изменением свойств материала путем преобразования кристаллической решетки пользуются при термической обработке металлов.

**Внутреннее строение** веществ изучают методами рентгеноструктурного анализа, электронной микроскопии и т. д. Под *внутренним строением вещества* подразумеваются расположение, взаимоотношение и взаимосвязь различных по размеру атомов, ионов и молекул, из совокупности которых слагаются различные вещества в твердом, жидком и газообразном состояниях. Атомно-молекулярное строение определяет микроскопические особенности материала.

Структура материала не остается неизменной, "застывшей". В пространстве и во времени она непрерывно претерпевает изменения. Этому, в частности, способствуют постоянное движение элементарных частиц, атомов, молекул, взаимодействие материала с окружающей средой. Почти все строительные материалы и их сырьевые смеси, по крайней мере на микроуровне, представляют собой дисперсные системы, т.е. микрогетерогенные системы, состоящие из двух или более фаз. Интервал размеров частиц дисперсной фазы обычно составляет от нескольких нанометров до ~ 100 мкм. Характер структуры материала как дисперсной системы во многом определяется характером и величиной связей или сил сцепления между структурными элементами. В зависимости от характера этих связей в дисперсных системах выделяют прочные фазовые контакты в *конденсационных* (сращивание за счет химических взаимодействий аморфных частиц) или *кристаллизационных* (сращивание за счет химических взаимодействий частиц в виде кристаллов) структурах дисперсных материалов, непосредственные атомные контакты в *сухих порошках* и сравнительно слабые силы молекулярного взаимодействия (Ван-дер-Ваальсовы), действующие между частицами через прослойки жидкой фазы, в *коагуляционных* структурах. Особенность структур второго и третьего видов – полная их обратимость по прочности. Конденсационные и особенно кристаллизационные структуры придают веществу повышенную прочность, хрупкость. Во многих случаях возможно сосуществование всех указанных видов структур. Например, при затворении цемента водой атомные (непосредственные) контакты переходят в коагуляционные, затем в фазовые. Этому переходу соответствует непрерывное изменение вязкости, модуля упругости и, главное, прочности дисперсных структур.



Помимо рассмотренных выше видов взаимодействий и соответствующих структур необходимо выделить такие важные взаимодействия, как *капиллярные*, проявляющиеся в трехфазных (твердое – жидкость – газ) дисперсных системах, к которым относятся подавляющее большинство сырьевых (бетонных, растворных, силикатных и т.п.) смесей для изготовления строительных материалов. На рис. 1 показано искривление жидкости в зазоре между двумя частицами шарообразной формы, а также между шарообразной частицей и плоскостью, приводящее к их стягиванию в результате растяжения жидкости и появления в ней отрицательного капиллярного давления (основная составляющая силы капиллярного сцепления). Преобладание капиллярных сил над другими составляющими межчастичного взаимодействия особенно заметно для частиц размером более 10 мкм и вплоть до 1-2 мм. Именно действием сил капиллярного сцепления объясняются экстремальные зависимости насыпного объема, уплотняемости сырьевых смесей, а также прочности свежесформованных изделий. Капиллярное сцепление проявляется также в капиллярно-пористых телах, структурные элементы которых в основном соединены другими связями некапиллярного характера. В этих телах силы капиллярного сцепления создают внутренние напряжения, вызывающие усадочные деформации, а также влияют на прочность материала.

Подобно тому, как образуются конденсационные или коагуляционные структуры, под действием сил капиллярного сцепления возникают *капиллярные структуры* в сырьевых смесях (рис. 2), которые затем накладывают свой отпечаток на строение и свойства материалов, полученных из этих смесей.

В полидисперсных трехфазных системах появление капиллярных менисков и возникновение сил капиллярного сцепления между тонкодисперсными и грубодисперсными частицами приводит к прилипанию тонкодисперсных частиц к грубодисперсным с образованием агрегатов-глобул. В сырьевых смесях в результате процессов капиллярного структурообразования и наиболее важного из них – глобулирования, концентрация вяжущего у поверхности заполнителей и в контактных зонах между ними выше средней концентрации в смеси. В этом одна из причин увеличения прочности и плотности материалов в указанных зонах. Более полное использование гидратационной и связующей активности вяжущего в прессованных строительных композитах (силикатный и бетонный кирпич полусухого прессования и т.п.) достигается на стадии приготовления сырьевых смесей при влажности, соответствующей их максимальному глобулированию. В этом случае жидкая фаза играет роль усиливающего компонента, упрочняя материал за счет перевода матричного цементирующего вещества из объемного состояния в пленочное с более высокими прочностью и структурированностью.

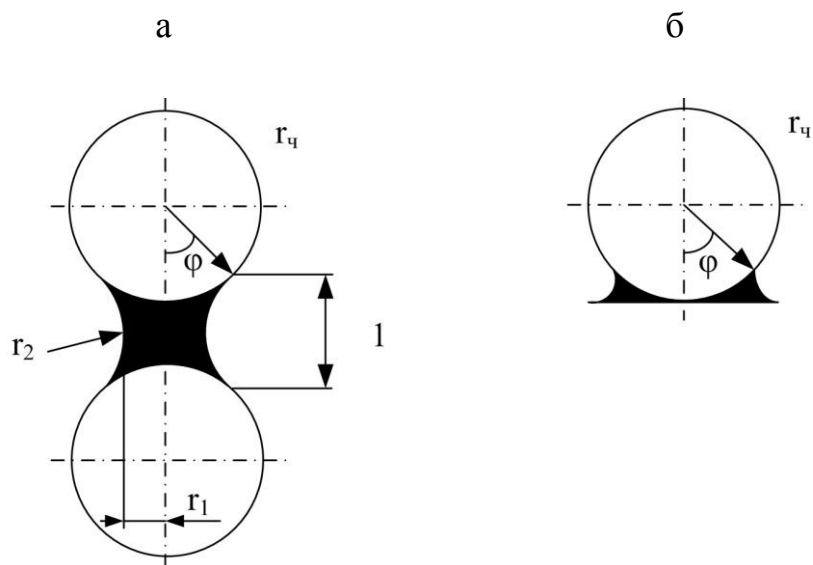


Рис.1. Силы капиллярного сцепления:  
 а – между двумя шарообразными частицами;  
 б – шарообразной частицей и плоскостью

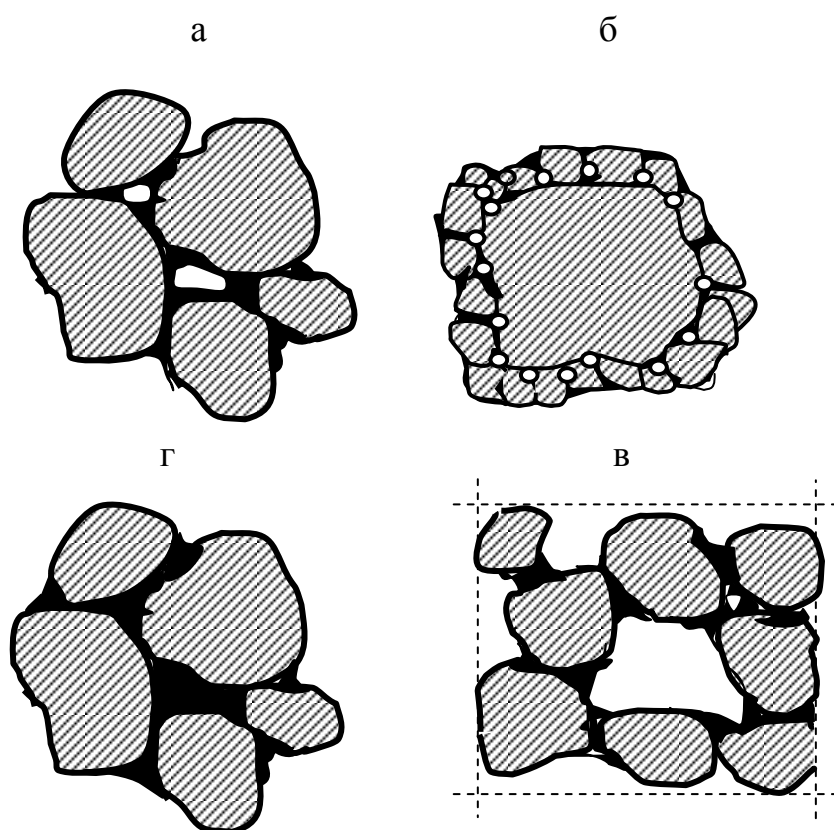


Рис.2. Капиллярные структуры в дисперсных системах:  
 а – трехфазная гранула; б – трехфазная глобула; в – ячеисто-глобулярная структура; г – двухфазная гранула

Если для дисперсных систем и материалов определяющими являются контактные взаимодействия, характер и величина которых обуславливают соответствующий тип структуры (эффект поверхностей), то для грубозернистых заполнителей наибольшее значение имеют закономерности укладки в зависимости от размеров и формы зерен (эффект масс). Заполнители подбирают из условия обеспечения наименьшего объема межзерновых пустот, что позволяет экономить на расходе вяжущего вещества. С этой целью заполнители предварительно разделяют на фракции по размерам с тем, чтобы затем пробным подбором или расчетом найти содержание каждой фракции для получения их плотной смеси.

Свойства материалов связаны с особенностями их строения и свойствами тех веществ, из которых данный материал построен. В свою очередь строение материала зависит: для природных материалов – от их происхождения и условий образования, для искусственных – от технологии производства и обработки материала.

### 1.3. Основные свойства материалов

Чтобы правильно выбрать материал, спроектировать и построить сооружение, надо хорошо знать свойства применяемых материалов. Выделяют основные свойства, важные для всех строительных материалов.

**Классификация основных свойств.** В зависимости от характера работы материала в конструкциях и его взаимодействия с окружающей средой различают: а) физические свойства (удельные и структурные характеристики, гидрофизические, теплофизические, акустические, электрические); б) механические свойства (деформативные и прочностные); в) химические свойства; г) биологические свойства; д) интегральные свойства – долговечность и надежность. Свойства материала всегда оценивают числовыми показателями, которые устанавливают путем испытаний.

#### 1.3.1. Физические свойства материалов

**Удельные и структурные характеристики** – это истинная, средняя и насыпная плотность материала, а также различные виды пористости.

*Истинная плотность*  $\rho$  (г/см<sup>3</sup>) – масса  $m$  единицы объема  $V_a$  материала в абсолютно плотном состоянии без пор и пустот:

$$\rho = \frac{m}{V_a}.$$

*Средняя плотность*  $\rho_o$  (кг/м<sup>3</sup>) – масса  $m$  единицы объема  $V_o$  материала в естественном состоянии вместе с порами и пустотами:

$$\rho_o = \frac{m}{V_o}.$$

Истинная плотность в отличие от средней плотности является достаточно постоянной характеристикой, которая не может быть изменена, как средняя плотность материала, до изменения его химического состава или молекулярной структуры. Большинство строительных материалов имеют поры, поэтому у них истинная плотность всегда больше средней. Лишь у плотных материалов (стали, стекла, битума) истинная и средняя плотность равны, так как объемы пор очень малы.

Часто среднюю плотность материала относят к плотности воды, при 4 °С равной 1 г/см<sup>3</sup>, и тогда определяемая плотность становится безразмерной величиной, которую называют относительной плотностью.

*Насыпная плотность*  $\rho_n$  (кг/м<sup>3</sup>) – отношение массы материала в насыпном состоянии к его объему. Насыпную плотность определяют для сыпучих материалов (песка, щебня, цемента и т. п.). В ее значении отражается влияние не только пор в каждом зерне, но и межзерновых пустот в рыхлонасыпанном объеме материала.

Значения средней и насыпной плотности материалов являются необходимыми характеристиками при расчете прочности сооружения с учетом собственной массы, для определения объемов, способа и стоимости перевозки материалов и т. д.

Во многом свойства материала определяют количество, размер и характер пор. *Пористость* – относительная величина (обычно в процентах), показывающая, какая часть объема материала занята внутренними порами или пустотами (пустотность). Поры представляют собой ячейки, не заполненные твердым веществом (по величине до нескольких миллиметров). Более крупные поры, например, между зернами сыпучих материалов, или полости, имеющиеся в некоторых изделиях (пустотелый кирпич, панели из железобетона), называют пустотами.

Различают общую, открытую и закрытую пористость. *Общая пористость* вычисляется по формуле

$$\Pi = \left( 1 - \frac{\rho_o}{\rho} \right) \cdot 100.$$

*Открытая пористость*  $\Pi_o$  определяется по водопоглощению (см. ниже). *Закрытая пористость*  $\Pi_z$  равна разности  $\Pi$  и  $\Pi_o$ .

Общая пористость колеблется в широких пределах: от 0,2-0,8 % – у гранита и мрамора, до 75-85 % – у теплоизоляционного кирпича и ячеистого бетона и свыше 90 % – у пенопластов и минеральной ваты.

**Гидрофизические свойства** – это свойства строительных материалов по отношению к действию воды (гигроскопичность, влажность, водопоглощение, влажностные деформации, водопроницаемость, водостойкость, а также морозостойкость – при одновременном действии воды и мороза).

*Гигроскопичностью* называют свойство пористого материала поглощать водяной пар из воздуха.

*Влажность* характеризует относительное содержание воды в материале в процентах.

*Водопоглощение* – способность материала впитывать и удерживать воду при непосредственном контакте с ней. Величина водопоглощения зависит от структуры материала, и прежде всего от открытой (капиллярной) пористости. Различают водопоглощение по массе  $B_m$  (%),

$$B_m = \frac{m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} \cdot 100,$$

и водопоглощение по объему  $B_o$  (%),

$$B_o = \frac{m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}}}{V_o \cdot \rho_v} \cdot 100,$$

где  $m_{\text{нас}}$  – масса образца, насыщенного водой, г;  $m_{\text{сух}}$  – масса сухого образца, г;  $V_o$  – объем образца,  $\text{см}^3$ ;  $\rho_v$  – плотность воды,  $1 \text{ г/см}^3$ .

Водопоглощение по массе изменяется в широких пределах, например, для гранита оно равно 0,02-0,7 %, тяжелого бетона – 2-4 %, кирпича – 8-15 %, для теплоизоляционного материала может быть более 100 %. Водопоглощение по объему характеризует в основном открытую пористость материала. Зная водопоглощение по массе  $B_m$  и плотность  $\rho_o$ , можно рассчитать водопоглощение по объему:

$$B_o = \frac{B_m \cdot \rho_o}{\rho_v}.$$

*Влажностные деформации* – это усадка и набухание. *Усадка* (усушка) – уменьшение объема и размеров материала при его высыхании. Оно вызывается уменьшением толщины слоев воды, окружающих частицы материала, и действием капиллярных сил, стремящихся их сблизить. *Набухание* (разбухание) – увеличение объема и размеров материала при его увлажнении. Оно происходит вследствие расклинивающего действия воды и уменьшения капиллярных сил.

*Водопроницаемость* – способность материала пропускать воду через свою толщу. Характеризуется величиной коэффициента фильтрации  $K_f$  ( $\text{м}^2/\text{ч}$ ), который определяется количеством воды, прошедшим через  $1 \text{ м}^2$  площади в течение 1 ч при постоянном давлении.

*Водонепроницаемость* – способность материала не пропускать воду, и она связана с коэффициентом фильтрации обратной зависимостью. Для бетона водонепроницаемость характеризуется марками W 2, W 4, ... W 20, обозначающими избыточное давление (0,2; 0,4; ... 2,0 МПа), при котором образец не пропускает воду при стандартном испытании (метод «мокрого пятна»). Водонепроницаемость повышается при уплотнении материала и уменьшении капиллярных пор.

*Водостойкость* характеризуется коэффициентом размягчения  $K_p$ , который вычисляется по формуле

$$K_p = \frac{R_{\text{нас}}}{R_{\text{сух}}},$$

где  $R_{\text{нас}}$  – предел прочности на сжатие в насыщенном водой состоянии, МПа;  $R_{\text{сух}}$  – предел прочности на сжатие в сухом состоянии, МПа.

К неводостойким материалам относят материалы с  $K_p$  менее 0,6, к ограниченно водостойким – материалы с  $K_p$  не ниже 0,6, а к водостойким – материалы с  $K_p$  не ниже 0,7 (0,8 – для гидротехнических сооружений и фундаментов).

*Морозостойкость* – способность материала выдерживать многократное и попеременное замораживание и оттаивание в насыщенном водой состоянии. Разрушение материала при его замораживании в насыщенном водой состоянии связано с образованием в порах льда, объем которого примерно на 9 % больше объема воды. Морозостойкость количественно оценивается маркой по морозостойкости. За марку по морозостойкости принимают наибольшее число циклов попеременного замораживания и оттаивания, которое выдерживают образцы материала без видимых признаков разрушения и определенного снижения прочности и потери массы. Установлены марки по морозостойкости: тяжелого бетона –  $F 25$ -  $F 1000$ , керамического и силикатного кирпича –  $F 15$ -  $F 50$  и т.д.

**Теплофизические свойства** характеризуют отношение материала к действию тепла.

*Теплопроводность* – способность материала передавать тепло от тела с большей температурой к менее теплomu. Характеризуется коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  (Вт/(м · °C)), который равен

$$\lambda = \frac{Q \cdot \delta}{A \cdot (t_1 - t_2) \cdot T},$$

где  $Q$  – количество тепла, Дж;  $\delta$  – толщина материала, м;  $A$  – площадь сечения, м<sup>2</sup>;  $(t_1 - t_2)$  – разность температур, °C;  $T$  – продолжительность прохождения тепла, с.

Теплопроводность зависит от структуры материала, его влажности и температуры. Существует эмпирическая формула Некрасова для определения теплопроводности материала по его средней плотности

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

где  $d$  – относительная плотность материала (плотность материала по отношению к плотности воды – 1 г/см<sup>3</sup>), безразмерная величина.

Теплопроводность зависит от влажности материала, так как вода обладает большей теплопроводностью (в 25 раз) по сравнению с теплопроводностью воздуха.

*Термическое сопротивление*  $R$ ,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ , конструкции толщиной  $\delta$  равно

$$R = \frac{\delta}{\lambda}.$$

*Теплоемкость* определяется количеством теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг данного материала, чтобы повысить его температуру на 1  $^\circ\text{C}$ . С повышением влажности материалов их теплоемкость возрастает, так как вода имеет теплоемкость 4,19 кДж/(кг  $\cdot$   $^\circ\text{C}$ ).

*Огнеупорность* – способность материала выдерживать длительное влияние высоких температур под нагрузкой.

*Огнестойкость* – способность материала выдерживать кратковременное воздействие открытого огня. Различают материалы: *несгораемые*, т.е. которые не горят и не поддерживают горение (бетон, металл, керамика); *трудносгораемые*, т.е. которые при воздействии огня горят (тлеют), а при удалении огня прекращают горение (асфальтобетон, пропитанная антипиренами древесина); *сгораемые* (древесина, полимерные материалы).

### 1.3.2. Механические свойства строительных материалов

Механические свойства характеризуют способность материала сопротивляться внутренним напряжениям и деформациям под влиянием силовых, тепловых, усадочных или других воздействий.

Механические свойства разделяют на деформативные (упругость, пластичность и другие) и прочностные (пределы прочности при сжатии, растяжении, изгибе, скалывании; ударная прочность или сопротивление удару; сопротивление истиранию).

**Деформативные свойства.** *Упругость* – свойство материала принимать после снятия нагрузки первоначальную форму и размеры. Модуль упругости (модуль Юнга) характеризует меру жесткости материала, т.е. его способность сопротивляться упругому изменению формы и размеров при приложении к нему внешних сил. Модуль упругости  $E$  (МПа) вычисляется из закона Гука:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon},$$

где  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $\varepsilon$  – относительная деформация.

*Пластичность* – свойство материала при нагружении в значительных пределах изменять размеры и форму без образования трещин и разрывов и сохранять эту форму после снятия нагрузки. Пластическая деформация, медленно нарастающая без увеличения напряжения, характеризует пла-

стичность материала. Чаще всего с повышением скорости нагружения и понижением температуры материала деформации по своему характеру приближаются к упругопластическим.

Пластическая деформация, медленно нарастающая длительное время (месяцы и годы), при нагрузках, меньших тех, которые способны вызвать остаточную деформацию за обычные периоды наблюдений, называется деформацией *ползучести*, а процесс такого деформирования – *ползучестью*.

*Релаксация* – свойство материала самопроизвольно снижать напряжения при условии, что начальная величина деформации зафиксирована и остается неизменной. Время, в течение которого первоначальная величина напряжения снижается в  $e$  раз (где  $e$  – основание натуральных логарифмов), называется периодом релаксации.

*Хрупкость* – свойство материала под действием нагрузки разрушаться без заметной пластической деформации.

**Прочностные свойства** – это свойства материала сопротивляться, не разрушаясь, внутренним напряжениям и деформациям, возникающим под действием нагрузки или других факторов. Знание прочностных показателей позволяет правильно выбрать максимальные нагрузки, которые может воспринимать данный элемент при заданном сечении. Прочность материала оценивают пределом прочности (временным сопротивлением), определенным при данном виде деформации. Для хрупких материалов (природных каменных материалов, бетонов, строительных растворов, кирпича и др.) основной прочностной характеристикой является предел прочности на сжатие.

*Предел прочности на сжатие*  $R_{сж}$  (МПа) равен максимальному сжимающему напряжению, вызвавшему разрушение материала, т.е.

$$R_{сж} = \frac{P_{разр}}{A},$$

где  $P_{разр}$  – разрушающая сила, Н;  $A$  – площадь сечения до испытания, мм<sup>2</sup>.

Предел прочности на сжатие определяют путем нагружения до разрушения стандартных образцов на специальных прессах (испытательных машинах).

По той же формуле определяют *предел прочности на растяжение* для тех материалов, которые сопротивляются растягивающим напряжениям и деформациям (древесина, металлы и т.п.).

Для многих материалов (бетон, кирпич, древесина и др.) определяют *предел прочности на растяжение при изгибе*  $R_{изг}$  (МПа) по формулам:

– при одном сосредоточенном грузе, расположенном посередине образца-балочки прямоугольного сечения (рис.3а):



$$R_{\text{изг}} = \frac{3 \cdot P_{\text{разр}} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2};$$

– при двух одинаковых грузах, расположенных на одинаковом расстоянии от середины балочки (рис.3б):

$$R_{\text{изг}} = \frac{3 \cdot P_{\text{разр}} \cdot (l - a)}{2 \cdot b \cdot h^2},$$

где  $P_{\text{разр}}$  – разрушающая нагрузка, Н (кгс);  $l$  – расстояние между опорами балочки, мм (см);  $a$  – расстояние между двумя грузами, мм (см);  $b$  и  $h$  – ширина и высота балочки в поперечном сечении, мм (см).

При  $a = \frac{1}{3} \cdot l$  последняя формула упрощается:

$$R_{\text{изг}} = \frac{P \cdot l}{b \cdot h^2}.$$

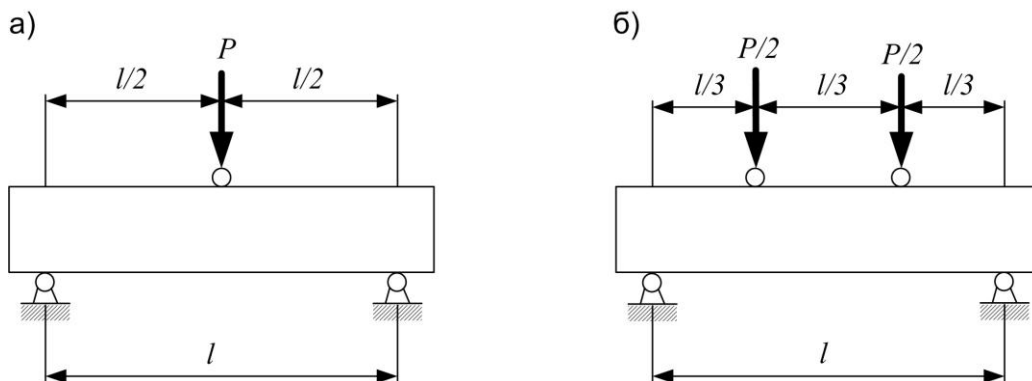


Рис. 3. Схемы испытаний на изгиб:

а – при одном сосредоточенном грузе; б – при двух одинаковых грузах

*Твердость* – свойство материала сопротивляться проникновению в него другого, более твердого, материала. Твердость каменных материалов, стекла оценивают с помощью шкалы твердости Мооса, состоящей из 10 минералов, расположенных по степени возрастания их твердости (1 – тальк, ... 10 – алмаз).

*Ударная вязкость (ударная или динамическая прочность)* – свойство материала сопротивляться ударным нагрузкам. Она характеризуется количеством работы, затраченной на разрушение стандартного образца на специальных приборах, называемых копрами, отнесенной к единице объема (Дж/см<sup>3</sup>).

*Сопротивление истиранию* – свойство материала сопротивляться истирающим воздействиям. Это свойство характеризуется истираемостью –

потерей массы при истирании образца на кругах истирания, отнесенной к его площади ( $\text{г/см}^2$ ).

Одновременное воздействие истирания и удара характеризует *износостойкость* материала. Это свойство определяют при испытании образцов в полочных барабанах.

#### 1.4. Понятие о композиционных материалах

На современном этапе развития науки о строительных материалах на базе достижений фундаментальных наук и под влиянием технических и социальных факторов сформировалось научное строительное материаловедение (НСМ) как фундаментальная наука прикладного характера. Основными постулатами НСМ являются осознание композиционной природы материалов, восприятие их как строительных композитов.

Композиционные материалы представляют собой гетерофазные системы, получаемые из двух или более компонентов с различными функциями. Один из компонентов, обладающий непрерывностью по всему объему, является матрицей или связующим веществом. Другой компонент – прерывный (дискретный), разделенный в объеме композиции, – является упрочняющим (армирующим) или выполняющим другую функцию (изоляционную, защитную и т.д.). Матричными материалами могут быть неорганические и органические вяжущие, полимеры, керамика, металлы и их сплавы. В качестве упрочняющих компонентов выступают волокнистые материалы различной природы, а также тонкодисперсные порошкообразные частицы или более крупные зерна. На каждом уровне изучения структуры сложного композита можно выделить матричный и дискретный (например, упрочняющий) компоненты.

В композиционных материалах – *композитах* разнородные компоненты создают синергетический эффект – новое качество материала, отличное от свойств исходных компонентов, т.е. когда «целое больше, чем сумма составных частей». В конструктивных композитах главное – это достижение высокой удельной прочности (коэффициента конструктивного качества), высокой коррозионной стойкости, эксплуатационной надежности и долговечности.

По мере развития строительного материаловедения как фундаментальной науки о строительных материалах проникновение в структуру композиционных материалов становится магистральным направлением развития науки о материалах, причем изучение проблемы формирования прочности материалов как дисперсных структур базируется на стыке таких фундаментальных наук, как физическая и коллоидная химия, механика сплошной среды и структурная теория разрушения. При этом очевидно, что для понимания синтеза прочности и регулирования деформативности структур помимо химических процессов необходимо уделять должное

внимание явлениям физического и физико-химического характера, в том числе на стадии приготовления сырьевых смесей.

Известно, что из трех составляющих прочности композитов: прочности заполнителя, матрицы и контактного слоя – особое значение имеет прочность контактного слоя. При этом контактный слой – это не только прочность в обычном понимании, но и проницаемость, морозостойкость и ряд других свойств, связанных с долговечностью и надежностью материала. Состав и структура тонких контактных слоев отличаются от состава и структуры основного цементирующего вещества (а тем более заполнителя), хотя различие в качестве приповерхностного слоя и объема цементирующего вещества является не скачкообразным, а плавным. Согласно структурной теории разрушения состояние материала по мере возрастания нагрузки рассматривается проходящим через три стадии: I стадия характеризуется тем, что действующая нагрузка меньше критической и возможные микротрещины концентрируются в контактном слое, но в длину не растут; II стадия – контактные трещины устойчиво растут в длину, что сопровождается значительным ростом ширины их раскрытия; III стадия – трещины выходят в матрицу, что завершается образованием магистральной трещины, приводящей к разрушению материала. Таким образом, примат отдается контактной зоне композита, причем наиболее важно знать предысторию его разрушения, которая, в свою очередь, во многом наследуется из начальных этапов структурообразования дисперсных структур. Временные структуры, возникающие на этих этапах, являются диссипативными (по Пригожину), т.е. такими, которые характеризуются рассеянием энергии и ее переходом из одной формы в другую. Очевидно, что к таким структурам в полной мере относятся капиллярные структуры, возникающие в сырьевых смесях строительных материалов (см. п.1.1).

## 2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Основным природным сырьем для производства строительных материалов являются **горные породы**. Их используют для изготовления керамики, стекла, металла, неорганических вяжущих веществ. Сотни кубометров песка, гравия и щебня применяют ежегодно в качестве заполнителей для бетонов и растворов.

Другим важным сырьевым источником являются **техногенные вторичные ресурсы** (отходы промышленности). Пока они используются недостаточно. Но по мере истощения природных ресурсов, повышения требований к охране окружающей среды и разработки новых эффективных технологий техногенное сырье будет применяться значительно шире.

## 2.1. Горные породы как сырьевая база производства строительных материалов

*Горные породы* – это значительные по объему скопления минералов в земной коре, образовавшиеся в результате физико-химических процессов.

*Минералы* – это вещества, являющиеся продуктами физико-химических процессов в земной коре и обладающие определенным химическим составом, однородным строением и характерными физико-механическими свойствами.

По условиям образования горные породы разделяют на три основные группы.

*Магматические* (первичные) горные породы образовались при охлаждении и отвердевании магмы.

*Осадочные* (вторичные) горные породы образовались в результате естественного процесса разрушения первичных и других пород под влиянием механического, физического и химического воздействия внешней среды.

*Метаморфические* (видоизмененные) горные породы образовались в результате последующего изменения первичных и вторичных пород, связанного со сложными физико-химическими процессами в земной коре (давлением, температурой и т.п.).

### 2.1.1. Магматические горные породы

Они могут быть: а) глубинными (интрузивными); б) излившимися (эффузивными). *Глубинные* – это породы, образовавшиеся при застывании магмы на разной глубине в земной коре. *Излившиеся* породы образовались при вулканической деятельности, излиянии магмы и ее затвердении на поверхности.

**Главные породообразующие минералы** – кварц (и его разновидности), полевые шпаты, железисто-магнезиальные силикаты, алюмосиликаты. Все эти минералы отличаются друг от друга по свойствам, поэтому преобладание в породе тех или иных минералов меняет ее строительные свойства: прочность, стойкость, вязкость и способность к обработке (к полировке, шлифовке и т.п.).

*Кварц*, состоящий из кремнезема (диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ ) в кристаллической форме, является одним из самых прочных и стойких минералов. Он обладает: исключительно высокой прочностью (при сжатии до 2000 МПа); высокой твердостью, уступающей только твердости топаза, корунда и алмаза; высокой кислотостойкостью и вообще химической стойкостью при обычной температуре; высокой огнеупорностью (плавится при температуре 1700°C). Цвет кварца чаще всего молочно-белый, серый. Благодаря высокой прочности и химической стойкости кварц остается почти неизменным при выветривании магматических пород, в состав которых он

входит. Поэтому кварц является также одним из наиболее встречающихся минералов и в осадочных породах.

*Полевые шпаты* – это самые распространенные минералы в магматических породах (до 2/3 от общей массы породы). Они представляют собой, так же как и кварц, светлые составные части пород (белые, розоватые, красные и т.п.). Главными разновидностями полевых шпатов являются ортоклаз и плагиоклазы. По сравнению с кварцем полевые шпаты обладают значительно меньшими 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 глинистый минерал – каолинит.

К цветным (темноокрашенным) минералам, встречающимся в магматических породах, относятся железисто-магнезиальные и магнезиальные силикаты и некоторые алюмосиликаты.

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

В группе **алюмосиликатов** наиболее распространены слюды: обыкновенные – мусковит (почти бесцветный), флогопит и биотит (темного цвета); гидрослюды – гидромусковит, гидробиотит.

Все вышеперечисленные минералы, за исключением мусковита и гидромусковита, отличаются от кварца и полевых шпатов темной окраской (зеленого, темно-зеленого, иногда черного цвета). Характерными свойствами цветных минералов (за исключением слюд) являются высокая прочность и ударная вязкость, а также повышенная плотность по сравнению с другими минералами, которые входят в состав магматических пород.

Водные алюмосиликаты (слюды) являются нежелательной составной частью пород. Они понижают прочность пород, ускоряют их выветривание и затрудняют шлифовку и полировку, так как в результате совершенной спайности слюды легко разделяются на очень тонкие пластинки. Бетоны и строительные растворы на песке со значительным содержанием слюды обладают пониженной морозостойкостью.

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

**Глубинные (интрузивные) горные породы.** При медленном остывании магмы в глубинных условиях возникают полнокристаллические структуры. Следствием этого является ряд общих свойств глубинных горных пород: весьма малая пористость и, следовательно, большая плотность и высокая прочность. Обработка таких пород из-за их высокой прочности затруднительна. Однако благодаря высокой плотности они хорошо поли-

руются и шлифуются. Средние показатели важнейших строительных свойств таких пород: прочность при сжатии 100-300 МПа; плотность 2600-3000 кг/м<sup>3</sup>; водопоглощение меньше 1 % по объему; теплопроводность около 3 Вт/(м · °С).

*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 при сжатии – 120-250 МПа (иногда до 300 МПа). Сопротивление растяжению, как у всех каменных материалов, относительно невысокое и составляет лишь около 1/30-1/40 от сопротивления сжатию.

Одним из важнейших свойств гранитов является малая пористость, не превышающая 1,5 %, что обуславливает водопоглощение около 0,5 % (по объему). Поэтому морозостойкость их высокая. Огнестойкость гранита недостаточна, так как он растрескивается при температурах выше 600 °С вследствие полиморфных превращений кварца. Гранит, так же как и большинство других плотных магматических пород, обладает высоким сопротивлением истиранию.

Граниты весьма разнообразны по цвету, зависящему в основном от окраски полевых шпатов. Граниты являются прекрасным декоративным облицовочным материалом. В связи с высокой прочностью на сжатие, морозостойкостью граниты применяют для защитной облицовки набережных, устоев мостов, цоколей зданий, а также в качестве щебня для высокопрочных и морозостойких бетонов. Кроме того, благодаря значительной кислотостойкости граниты применяют в качестве кислотоупорной облицовки.

Из всех изверженных пород граниты наиболее широко используют в строительстве, так как они являются самой распространенной из глубинных магматических пород. Остальные глубинные породы (сиениты, диориты, габбро и др.) встречаются и применяются значительно реже.

**Излившиеся (эффузивные) горные породы.** Магматические породы, образовавшиеся при кристаллизации магмы на небольших глубинах и занимающие по условиям залегания и структуре промежуточное положение между глубинными и излившимися породами, имеют полнокристаллические неравномернозернистые и неполнокристаллические структуры.

Среди неравномернозернистых структур выделяют порфировидные и порфировые структуры. *Порфировидные структуры* обусловлены наличием относительно крупных кристаллов на фоне мелкокристаллической основной массы породы. *Порфировые структуры* характеризуются наличием хорошо образованных кристаллов – порфировых «вкрапленников», погруженных в стекловидную основную массу породы. Из магматических пород, образовавшихся при кристаллизации магмы на небольших глуби-

нах, в строительстве наиболее широко применяют кварцевые и бескварцевые (полевошпатовые) порфиры.

*Кварцевые порфиры* по своему минеральному составу близки к гранитам. Их прочность, пористость, водопоглощение сходны с показателями этих свойств, присущими гранитам. Но порфиры более хрупки и менее стойки вследствие наличия крупных вкраплений.

*Бескварцевые порфиры* (полевошпатовые) по своему составу близки к сиенитам, но в связи с иным генезисом обладают худшими физико-механическими свойствами.

Излившиеся горные породы, образовавшиеся в результате излияния магмы, ее охлаждения и застывания на поверхности земли, состоят, как правило, из отдельных кристаллов, вкрапленных в основную мелкокристаллическую, скрытокристаллическую и даже стекловатую массу. Излившиеся породы в результате неравномерного распределения минеральных компонентов сравнительно легко разрушаются при выветривании и под воздействием внешних условий, а также обнаруживают анизотропность механических свойств. Различают эффузивы: излившиеся плотные и излившиеся пористые.

К **плотным** излившимся породам относят андезиты, базальты, диабазы, трахиты, липариты.

*Андезиты* – излившиеся аналоги диоритов – породы серого или желтовато-серого цвета. Андезиты содержат плагиоклазы, роговую обманку, некоторые пироксены и биотит. Структура может быть неполнокристаллическая или стекловатая. Плотность андезитов  $2700-3100 \text{ кг/м}^3$ , предел прочности при сжатии  $140-250 \text{ МПа}$ . Андезиты применяют для получения кислотостойких облицовочных изделий, в виде щебня для кислотоупорного бетона.

*Базальты* – излившиеся аналоги габбро – породы черного цвета, скрытокристаллические или тонкозернистые, иногда порфировые. Физико-механические свойства сходны со свойствами андезитов. Базальты ввиду большой твердости и хрупкости трудно обрабатываются, но хорошо полируются. Применяют главным образом в качестве бутового камня и щебня для бетонов, в дорожном строительстве (для мощения улиц); особо плотные породы используют в гидротехническом строительстве. Базальты являются исходным сырьем для литых каменных изделий, используются для получения минеральных волокон в производстве теплоизоляционных материалов.

К **пористым** излившимся породам относят пемзу, вулканические туфы и пеплы, туфолавы. *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 60 %; стенки между пораами сложены стеклом. Твердость пемзы около 6, истинная плотность  $2-2,5 \text{ г/см}^3$ , плотность  $0,3-0,9 \text{ г/см}^3$ . Большая

пористость пемзы обуславливает хорошие теплоизоляционные свойства, а замкнутость большинства пор – достаточную морозостойкость. Пемза – ценный заполнитель в легких бетонах (пемзобетоне). Наличие в пемзе активного кремнезема позволяет использовать ее в виде гидравлической добавки к цементам и извести. В качестве абразивного материала пемзу применяют для шлифовки металлов и дерева, полировки каменных изделий.

*Вулканический пепел* – наиболее мелкие частицы лавы, обломки отдельных минералов, выброшенные при извержении вулкана. Происхождение пепла объясняется размельчением лавы при вулканических взрывах. Размеры частичек пепла колеблются от 0,1 до 2 мм. Вулканический пепел является активной минеральной добавкой.

*Вулканические туфы* – горные породы, образовавшиеся из твердых продуктов вулканических извержений: пепла, пемзы и других, впоследствии уплотненных и сцементированных. *Туфолава* – горная порода, занимающая промежуточное положение между пеплом и туфом. Образование туфолав связывают с быстрым вспениванием лав при резком падении давления и связанным с этим дроблением вкрапленников и стекла без разрыва сплошности лавного потока. 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.

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 и др. Применяются туфы и в виде щебня для легких бетонов.

### 2.1.2. Осадочные горные породы

Осадочные породы в зависимости от условий их образования делят на три подгруппы: а) обломочные породы или механические осадки – рыхлые (гравий, глины, пески), оставшиеся на месте разрушения пород или перенесенные водой, льдом (ледниковые отложения) или ветром (эоловые отложения); сцементированные (песчаники, конгломераты, брекчии), зерна которых сцементированы различными природными «цементами»; б) химические осадки (гипс, известняк и др.), образовавшиеся из продуктов разрушения пород, перенесенных водой в растворенном виде; в) органогенные породы, образовавшиеся из остатков некоторых водорослей и животных (скелеты губок, кораллов, раковины и панцири ракообразных и др.); к органогенным породам относятся мел, известняк-ракушечник, диатомиты.

Большинство осадочных пород имеет более пористое строение, чем плотные магматические породы, а следовательно, и меньшую прочность. Некоторые из них сравнительно легко растворяются (например, гипс) или распадаются в воде на мельчайшие частицы (например, глины).



**Главные породообразующие минералы.** В составе осадочных пород можно выделить две различные по своему происхождению группы минералов: реликтовые и минералы осадочного происхождения. К первой группе относят минералы магматические и метаморфические; обычно зерна этих минералов окатаны; ко второй – минералы, образовавшиеся на месте в осадке или породе.

Наиболее распространенные минералы **группы кремнезема** – кварц, опал, халцедон. В осадочных породах присутствует *кварц магматического происхождения* и *кварц осадочный*. Осадочный кварц отлагается непосредственно из растворов, а также образуется в результате перекристаллизации опала и халцедона. Он широко распространен в кремнистых породах, заполняет трещины, поровые пространства и другие полости в песчаниках и известняках.

*Опал* – аморфный кремнезем. Опал чаще всего бесцветен или молочно-белый, но в зависимости от примесей может быть желтым, голубым или черным. Плотность 1,9-2,5 г/см<sup>3</sup>, максимальная твердость 5-6, хрупок. Опал, халцедон, некоторые вулканические породы при применении в составе соответствующих горных пород в качестве заполнителей бетона могут вступать в реакцию со щелочами цемента, вызывая разрушение бетона (опал является наиболее реакционноспособным из указанных компонентов).

Минералы **группы карбонатов** имеют широкое распространение в осадочных породах. Наиболее важную роль в них играют кальцит, доломит и магнезит.

*Кальцит* (CaCO<sub>3</sub>) – бесцветный или белый, при наличии механических примесей серый, желтый, розовый или голубоватый минерал. Блеск стеклянный. Плотность 2,7 г/см<sup>3</sup>, твердость 3. Характерным диагностическим признаком является бурное вскипание в 10 %-ной соляной кислоте.

*Доломит* [CaMg(CO<sub>3</sub>)]<sub>2</sub> – бесцветный, белый, часто с желтоватым или буроватым оттенком минерал. Блеск стеклянный. Плотность 2,8 г/см<sup>3</sup>, твердость 3-4. В 10 %-ной соляной кислоте вскипает только в порошке и при нагревании. Доломит обычно мелкозернистый, крупные кристаллы встречаются редко. Образуется он либо как первичный химический осадок, либо в результате доломитизации известняков. Минерал доломит слагает породу того же названия.

*Магнезит* (MgCO<sub>3</sub>) – бесцветный, белый, серый, желтый, коричневый минерал. Плотность 3,0 г/см<sup>3</sup>, твердость 3,5-4,5. Растворяется в HCl при нагревании. Минерал магнезит слагает породу того же названия.

Представители **группы глинистых минералов** слагают глины, а также могут находиться в качестве примесей в песчаниках, алевролитах, известняках и многих других породах, существенно изменяя их физико-механические свойства. Минералы этой группы относятся к водным алю-

мосиликатам. Наиболее широко распространены каолинит, монтморилло-нит и гидрослюды.

*Каолинит* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) – белый, иногда с буроватым или зеленоватым оттенком минерал. Плотность  $2,6 \text{ г/см}^3$ , 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. Каолинит слагает каолиновые глины, входит в состав полиминеральных глин, иногда присутствует в цементе обломочных пород.

*Монтмориллонит* слагает бентонитовые глины, иногда служит цементирующим материалом в песчаниках.

*Гидрослюды* образуются при разложении слюд и некоторых других силикатов (например, полевых шпатов). Примеси глинистых минералов в известняках и песчаниках нежелательны, так как содержание уже 3-4 % глины резко понижает их водостойкость и морозостойкость.

Наиболее распространенными минералами **группы сульфатов** являются гипс и ангидрит.

*Гипс* ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) представляет собой скопление белых или бесцветных кристаллов, иногда окрашенных механическими примесями в голубые, желтые или красные тона. Блеск стеклянный. Плотность  $2,3 \text{ г/см}^3$ , твердость 2. Для гипса, развивающегося в пустотах и трещинах, характерны волокнистое строение и шелковистый блеск.

*Ангидрит* ( $\text{CaSO}_4$ ) – белый, серый, светло-розовый, светло-голубой минерал. Блеск стеклянный. Плотность  $3,0 \text{ г/см}^3$ , твердость 3-3,5. Как правило, встречается в виде сплошных мелкозернистых агрегатов. Гипс и ангидрит слагают породы того же названия, широко распространенные в соленосных отложениях.

Осадочные породы нередко содержат **органические остатки** животного и растительного происхождения, сложенные кремнистым или известковым веществом. Представителями этой группы минералов являются диатомиты, сложенные остатками диатомовых водорослей.

**Обломочные породы.** Породы рассматриваемой группы сложены преимущественно зернами устойчивых к выветриванию минералов и горных пород.

**Рыхлые** обломочные породы – *песок* (с зернами преимущественно до 5 мм) и *гравий* (с зернами свыше 5 мм) – применяют в качестве заполнителей для бетона, в дорожном строительстве, для железнодорожного балласта. Пески служат компонентом сырьевой смеси в производстве стекла, керамических и многих других изделий.

*Глинистые породы* сложены более чем на 50 % частицами мельче 0,01 мм, причем не менее 25 % из них имеют размеры меньше 0,001 мм. Они характеризуются сложным минеральным составом. Кроме того, глинистые породы могут содержать обломочные зерна кварца, полевых шпа-

тов, слюд, а также гидроокислы, карбонаты, сульфаты и прочие минералы. Наличие обломочной примеси оказывает существенное влияние на степень пластичности глины.

За основу минералогической классификации глинистых пород принимается состав глинистых минералов. *Каолиновые* глины сложены минералом каолинитом. Обычно эти глины окрашены в светлые тона, жирные на ощупь, они малопластичны, огнеупорны.

*Полимиктовые* глины характерны наличием двух или нескольких минералов, причем ни один из них не является преобладающим. Они окрашены в бурые, коричневые, серые или зеленоватые тона. Обычно содержат значительное количество песчаной и алевроитовой примеси и различные карбонаты, сульфаты, сульфиды, гидроокислы железа и т.п.

Каолиновые глины являются огнеупорными и их широко используют в керамической промышленности в этом качестве. Гидрослюдистые глины и глины полимиктового состава применяют для изготовления кирпича, грубой керамики и других изделий. Глины являются также компонентом сырьевой смеси в производстве цемента. Глины используют как строительный материал при возведении земляных плотин (экраны и пр.).

**Сцементированные** обломочные породы – песчаники, конгломераты, брекчии. *Песчаник* состоит из зерен песка, сцементированных различными природными «цементами». Если в состав пород входят крупные куски (гравий или щебень), то им даются название *конгломерата* (при округлых кусках) и *брекчии* (при остроугольных кусках). Из них чаще всего применяются в строительстве песчаники (так же, как и плотные известняки). Однако наличие кварцевых зерен делает песчаники труднообрабатываемыми.

**Хемотропные породы.** Среди пород химического происхождения наиболее важными в строительном деле являются карбонатные, сульфатные и аллитовые породы.

Наиболее распространенными **карбонатными** породами являются известняки и доломиты. *Известняк* – порода, сложенная более чем на 50 % кальцитом; доломит – порода, состоящая более чем на 50 % из доломита. Количество глинистой примеси в карбонатных породах может колебаться в широких пределах. Порода, характеризующаяся приблизительно равным содержанием карбонатного и глинистого материала, называется *мергелем*.

Пористость плотных известняков не превышает десятых долей процента, а рыхлых достигает 15-20 %. Окраска известняков зависит от примесей и может быть различной: белой, желтоватой, бурой, серой, темно-серой до черной.

*Доломиты* по внешнему виду похожи на известняки. Цвет доломитов белый, желтовато-белый, светло-бурый. Для них характерны микрозернистые и кристаллически-зернистые структуры.

Благодаря широкому распространению, легкой добыче и обработке известняки, доломитизированные известняки и доломиты применяют в

строительстве чаще, чем другие породы. Их используют в виде бутового камня для фундаментов, стен неотапливаемых зданий или жилых домов в районах с теплым климатом, а наиболее плотные породы применяют в виде плит и фасонных деталей для наружных облицовок зданий. Известняковый щебень часто используют в качестве заполнителя для бетона. Известняки широко применяют как сырье для получения вяжущих веществ – извести и цемента. Доломиты используют для получения вяжущих и огнеупорных материалов в цементной, стекольной, керамической и металлургической промышленности.

**Сульфатные** породы – гипс и ангидрит; в природных условиях в результате гидратации и дегидратации они переходят друг в друга. Ангидрит отличается от гипса большей твердостью. Гипс и ангидрит служат сырьем для получения вяжущих веществ, иногда их применяют в виде облицовочных изделий.

**Аллитовые** породы характеризуются высоким содержанием глинозема. В этой группе выделяют две главные породы: бокситы и латериты. Пороодообразующими минералами *бокситов* являются гидроксиды алюминия (гиббсит и диаспор). Бокситы разнообразны по внешнему виду. Они могут быть мягкими, рыхлыми, похожими на глину и плотными с раковистым изломом. Пластичностью бокситы не обладают. Окраска обусловлена наличием гидроксидов железа. Чаще она бывает красная, бурая, коричневая, зеленовато-серая. Бокситы используют для производства алюминия, искусственных абразивов, огнеупоров, глиноземистого цемента.

**Органогенные породы.** К осадочным органогенным породам относятся биогенные кремнистые породы и органогенные известняки.

**Биогенные кремнистые** породы (силициды) сложены осадочным кремнеземом (опалом, халцедоном, кварцем). Главными разновидностями кремнистых пород являются диатомиты, радиоляриты, спонголиты, трепелы, опоки. *Диатомиты* – легкие светлые тонкопористые породы, состоящие из опаловых скелетов диатомовых водорослей. *Трепелы* и *опоки* – белые или серые, очень легкие, похожие на каолиновую глину или мел, породы, состоящие из опала, реже халцедона.

Кремнистые породы находят разнообразное практическое применение. Диатомиты, трепелы, опоки применяют для производства теплоизоляционных материалов, в виде минеральных добавок к вяжущим веществам (воздушной извести, портландцементу).

**Органогенные известняки** (например, известняки-ракушечники) могут быть сложены целыми раковинами или обломками раковин различных морских беспозвоночных, а также остатками известковых водорослей. Разновидность органогенных известняков – *мел*. Это микрозернистая слабоцементированная порода белого цвета.

Известняки-ракушечники применяют в строительстве в виде строительного камня. Способность легко распиливаться, небольшая плотность

(от 0,8 до 1,8 г/см<sup>3</sup>), малая теплопроводность – характерные свойства этого материала.

### 2.1.3. Метаморфические горные породы

*Метаморфизмом* называют преобразование горных пород, происходящее в недрах земной коры под влиянием высоких температур и давлений. В этих условиях может происходить кристаллизация минералов без их плавления. Главными факторами метаморфизма являются температура, давление и химически активные вещества – растворы и газы, под действием которых породы любого состава и генезиса (магматические, осадочные или уже ранее метаморфизированные) подвергаются изменениям.

При формировании структурно-текстурных особенностей метаморфических пород велика роль направленного давления. При одностороннем давлении кристаллы деформируются в направлении, перпендикулярном направлению наибольшего давления, и видоизмененные породы приобретают сланцевое строение (гнейс, глинистые сланцы и т.п.).

**Главные породообразующие минералы.** Минералы, слагающие метаморфические породы, можно разделить на группы: минералы, широко распространенные как в метаморфических, так и в магматических породах (полевые шпаты, кварц, слюда, роговая обманка, большинство пироксенов, оливин и др.); типичные для осадочных пород минералы (кальцит, доломит); минералы, которые могут находиться в магматических породах в качестве вторичных, а также слагать типичные метаморфические породы (серпентин и др.); специфические метаморфические минералы, присутствие которых возможно только в глубоко преобразованных метаморфических породах.

**Основные разновидности метаморфических горных пород.** *Кристаллические сланцы* имеют мелкозернистое строение с полностью утраченными первичными текстурами и структурами. 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 естественными кровельными материалами – *кровельными сланцами*. Эти сланцы легко раскалываются по плоскостям сланцеватости на ровные и тонкие (2-8 мм) плоские плитки. Они должны отвечать определенным требованиям: иметь достаточную плотность и вязкость, твердость, малое водопоглощение, высокую водостойкость, стойкость к выветриванию. Плотность кровельных сланцев около 2,7-2,8 г/см<sup>3</sup>, пористость 0,3-3 %, предел прочности при сжатии 50-240 МПа. Большое значение имеет также прочность на излом перпендикулярно сланцеватости.

Кровельные сланцы используют в производстве кровельных плиток и некоторых строительных деталей (плит для внутренней облицовки помещений, лестничных ступеней, плит для пола, подоконных досок и т.п.).

*Гнейсы* – породы метаморфического генезиса, образовавшиеся при температуре 600-800 °С и высоком давлении. Исходными являются глинистые и кварцево-полевошпатовые (граниты) породы. 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 нежелательной формы зерен.

Образование *кварцитов* связано с перекристаллизацией песчаников. Важными свойствами кварцитов являются высокая огнеупорность (до 1710-1770 °С) и прочность на сжатие (100-450) МПа. В строительстве кварциты используют в качестве стенового камня, подферменных камней в мостах, бута, щебня и брусчатки, а кварциты с красивой и неизменяющейся окраской – для облицовки зданий. Кварциты применяют в производстве динаса – огнеупора, обладающего высокой кислотостойкостью.

*Мрамор* – мелко-, средне- и крупнозернистая плотная карбонатная порода, состоящая главным образом из кальцита и представляющая собой перекристаллизованный известняк. Прочность на сжатие составляет 100-300 МПа. Мрамор легко поддается обработке, вследствие малой пористости хорошо полируется. Мрамор широко применяется для внутренней отделки стен зданий, ступеней лестниц и т.п. В виде песка и мелкого щебня (крошки) его используют для цветных штукатурок, облицовочного декоративного бетона и т.п. В условиях сульфатной коррозии для наружных облицовок мрамор не применяют.

## 2.2. Техногенные вторичные ресурсы

По данным ЮНЕСКО, в мире ежегодно извлекают из недр более 120 млрд. т руд, горючих ископаемых, другого сырья (20 т сырья на каждого жителя планеты). По масштабам извлекаемого и перерабатываемого сырья хозяйственная деятельность человека превзошла вулканическую (10 млрд. т в год) и размыв суши всеми реками мира (25 млрд. т в год). Эта деятельность, кроме того, сопровождается образованием колоссального количества отходов. Основными «производителями» многотоннажных отходов являются: горнообогатительная, металлургическая, химическая, лесная и деревообрабатывающая, текстильная отрасли промышленности; энергетический комплекс; промышленность строительных материалов; агропромышленный комплекс; бытовая деятельность человека.

Из отраслей материального производства, способных потреблять промышленные (техногенные) отходы, наиболее емкой является промышленность строительных материалов. Отходы производства или побочные про-

дукты промышленности являются вторичными материальными ресурсами. Многие отходы по своему составу и свойствам близки к природному сырью. Установлено, что использование промышленных отходов позволяет покрыть до 40 % потребности строительства в сырьевых ресурсах. Применение промышленных отходов позволяет на 10-30 % снизить затраты на изготовление строительных материалов по сравнению с производством их из природного сырья, создавать новые строительные материалы с высокими технико-экономическими показателями и, кроме того, уменьшить загрязнение окружающей среды.

Все техногенные отходы можно разделить на две большие группы: минеральные и органические. Преобладающее значение имеют минеральные отходы: их больше, они лучше изучены и имеют наибольшее значение для производства строительных материалов.

В зависимости от преобладающих химических соединений минеральные отходы делят на силикатные, карбонатные, известковые, гипсовые, железистые, цинксодержащие, щелочесодержащие и т.д. Наибольшую практическую применимость имеет классификация отходов по отраслям промышленности их образующим и классификации для отдельных видов отходов.

**Шлаки черной металлургии** – побочный продукт при выплавке чугуна из железных руд (доменные, мартеновские, ферромарганцевые). Выход шлаков очень велик и составляет от 0,4 до 0,65 т на 1 т чугуна. В их состав входит до 30 различных химических элементов, главным образом в виде оксидов. Основные оксиды:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ . В меньших количествах присутствуют  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  и др. Состав шлака зависит от состава кокса, пустой породы и определяет особенности применения шлака.

В производстве строительных материалов используется 75 % общего количества доменных шлаков. Основным потребителем является цементная промышленность. Ежегодно она потребляет миллионы тонн гранулированного доменного шлака. Грануляция заключается в быстром охлаждении шлакового расплава, в результате чего шлак приобретает стекловидную структуру и, соответственно, высокую активность.

Сталеплавильные (мартеновские) шлаки применяются в меньшей степени. Трудности их использования связаны с неоднородностью, непостоянством химико-минералогического состава и физико-механических свойств.

**Шлаки цветной металлургии** чрезвычайно разнообразны по составу. Наиболее перспективное направление их использования – комплексная переработка: предварительное извлечение цветных и редких металлов из шлака; выделение железа; использование силикатного остатка шлака для производства строительных материалов.

При получении цветных металлов с помощью так называемых «мокрых» технологий образуются не шлаки, а шламы (буквальный перевод с немецкого - «грязь»). Это общее название осадков суспензий, получаемых в металлургических и химических производствах в результате процессов, осуществляемых гидрохимическим способом. Например, побочным продуктом при производстве алюминия является бокситовый шлам - рыхлый сыпучий материал красного цвета. При получении глинозема из нефелинового сырья в качестве побочного продукта образуется нефелиновый шлам. Иначе он называется белитовым шламом, так как в основном состоит из мелких кристаллов минерала белита. Если глинозем получают из высокоалюминатных глин, в качестве побочного продукта образуется каолиновый шлам и т.д. Основное применение все эти шламы находят в цементном производстве.

**Золы и шлаки тепловых электростанций (ТЭС)** – минеральный остаток от сжигания твердого топлива. Одна ТЭС средней мощности ежегодно выбрасывает в отвалы до 1 млн. т золы и шлака, а ТЭС, сжигающая многозольное топливо, – до 5 млн. т. По химическому составу топливные золы и шлаки состоят из  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  и др., а также содержат негоревшее топливо. Используются топливные золы и шлаки всего на 3-4 % от их ежегодного выхода.

Использование зол ТЭС в строительстве и других отраслях сдерживается целым рядом факторов, в частности тем, что на многих ТЭС используется гидроудаление золы, и получаемые золошлаковые отходы (ЗШО) неоднородны и имеют нестабильные физико-химические характеристики.

На современных ТЭС уголь сжигают в пылевидном состоянии. Шлак образуется в результате слипания размягченных частиц золы в объеме топki и накапливается в шлаковом бункере под топкой. Размер зерен шлака 1-50 мм. Зола уносится из топki с дымовыми газами (зола уноса) и улавливается при их очистке в циклонах и электрофильтрах. Размер частиц золы колеблется от нескольких микрон до 50-60 мкм. Большинство зол имеют сферическую форму частиц, гладкую остеклованную поверхность.

Золы и шлаки ТЭС возможно использовать при производстве практически всех строительных материалов и изделий. Например, введение 100-200 кг активной золы (уноса) на 1 м<sup>3</sup> бетона дает возможность экономить до 100 кг цемента. Шлаковый песок пригоден для замены природного песка, а шлаковый щебень – в качестве крупного заполнителя.

**Отходы горнодобывающей промышленности.** *Вскрышные породы* – горнорудные отходы, отходы добычи разнообразных полезных ископаемых. Особенно большое количество этих отходов образуется при добыче открытым способом. По ориентировочным подсчетам в стране ежегодно образуется свыше 3 млрд. т отходов, которые являются неисчерпаемым источником сырья для промышленности строительных материалов. Однако в настоящее время они используются лишь на 6-7 %. Вскрышные и пустые



породы находят применение в зависимости от своего состава (карбонатные, глинистые, мергелистые, песчаные и т.д.).

Вскрышные породы – не единственные отходы горнодобывающей промышленности. Большое количество пустой породы поднимается на поверхность земли, измельчается и направляется в отвалы в виде *хвостов обогащения*. Горнообогащительные комбинаты сбрасывают в отвалы большое количество флотационных хвостов, образующихся в частности при переработке руд цветных металлов. Отходы угледобычи и углеобогащения образуются на углеобогащительных фабриках. Для отходов угледобычи характерно постоянство состава, что их выгодно отличает от других видов минеральных отходов.

Попутнодобываемые породы и отходы промышленной переработки рудных полезных ископаемых отличаются по генезису, минеральному составу, структуре и текстуре от традиционно применяемых при производстве строительных материалов. Это объясняется существенным отличием глубин карьеров по добыче сырья для стройиндустрии (20-50 м) от современной разработки рудных месторождений (350-500 м).

**Гипсовые отходы химической промышленности** – продукты, содержащие сульфат кальция в той или иной форме. Научные исследования показали полноценную заменимость традиционного гипсового сырья отходами химической промышленности.

*Фосфогипс* – отход при производстве фосфорных удобрений из апатитов и фосфоритов. Он представляет собой  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  с примесями неразложившегося апатита (или фосфорита) и неотмытой фосфорной кислоты.

*Фторгипс* (фторангидрит) – побочный продукт при производстве фтористоводородной кислоты, безводного фтористого водорода, фтористых солей. По составу это  $\text{CaSO}_4$  с примесями исходного неразложившегося флюорита. Он может содержать также неотмытую серную кислоту.

*Титаногипс* – отход при сернокислотном разложении титаносодержащих руд. *Борогипс* – отход производства борной кислоты. *Сульфогипс* получается при улавливании серного ангидрида из дымовых газов ТЭС.

**Электротермофосфорные шлаки** – отходы производства фосфорной кислоты, получаемой по электротермическому способу. В гранулированном виде содержат 95-98 % стекла. Основные оксиды, входящие в их состав,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaO}$ . Являются ценным сырьем в производстве вяжущих веществ.

**Отходы деревообработки и лесохимии.** В настоящее время в нашей стране лишь 1/6 часть древесных отходов используется в целлюлозно-бумажной промышленности и промышленности строительных материалов.

Практически не используются кора, пни, вершины, ветви, сучья, а также отходы деревообработки – стружка, щепа, опилки.

**Отходы целлюлозно-бумажной промышленности** – осадки сточных вод и другие промышленные шламы. *Скоп* – продукт, получившийся в результате механической очистки сточных вод. Это грубодисперсные примеси, состоящие в основном из волокон целлюлозы и частиц каолина. *Активный ил* – продукт биологической очистки сточных вод, находящийся в виде коллоидов и молекул.

**Отходы промышленности строительных материалов.** При получении цементного клинкера до 30 % объема обжигаемого продукта уносится с дымовыми газами из печей в виде пыли. Эта пыль может возвращаться в производство, а также использоваться для раскисления почв и в производстве вяжущих веществ.

Кирпичный бой, старый и бракованный бетон используются в качестве искусственного щебня. Бетонный лом – отход предприятий сборного железобетона и сноса строительных объектов. Огромные объемы реконструкции жилого фонда, промышленных предприятий, транспортных сооружений, автодорог и т.д. ставят важную научно-техническую задачу по переработке отходов бетона и железобетона. Разработаны различные технологии разрушения строительных конструкций, а также специальное оборудование для переработки некондиционного бетона и железобетона.

**Прочие отходы и вторичные ресурсы** – отходы и бой стекла, макулатура, тряпье, резиновая крошка, отходы и попутные продукты производства полимерных материалов, попутные продукты нефтехимической промышленности и т.д.

Важнейшие виды строительных материалов, получаемые из вышеперечисленных отходов промышленности, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Отходы промышленности, используемые в производстве строительных материалов

Отходы	Области применения и материалы
Шлаки черной металлургии: доменные, мартеновские, ферромарганцевые	Портландцемент (производство клинкера), портландцемент с минеральной добавкой, шлакопортландцемент, смешанные бесцементные вяжущие, заполнители для бетонов, шлаковая вата, шлакоситаллы и т.д.
Отходы цветной металлургии: шлаки (медеплавильных печей, никелевого производства, свинцовой шахтной плавки и т.д.), шламы (бокситовый, нефелиновый, каолиновый)	Вяжущие автоклавного твердения, песок и щебень, портландцемент (производство клинкера), нефелиновый цемент, материалы для укрепления грунтов, огнеупоры, теплоизоляционные материалы и т.д.

Продолжение табл. 1

Золы и шлаки тепловых электростанций	Вяжущие, пористый гравий, газобетон, силикатные изделия, добавки к керамике и т.п.
Вскрышные породы: вскрышные и пустые породы, хвосты обогащения и т.д.	Портландцемент (производство клинкера), воздушная известь, минеральная вата, стекло, пигменты, керамический кирпич, силикатный кирпич, заполнители для бетонов и т.д.
Отходы угледобычи и углеобогащения: коксохимических предприятий, углеобогажительных фабрик, шахтные негорелые породы	Пористый заполнитель для бетона, керамический кирпич, материалы для строительства дорог
Гипсовые отходы химической промышленности: фосфогипс, фторгипс, титаногипс, борогипс, сульфогипс	Замена традиционного гипсового сырья
Отходы древесины и лесохимии: кора, пни, вершины, ветви, сучья, горбыль, стружки, щепа, опилки, лигнин, скоп и т.д.	Арболит, фибролит, ДВП, ДСП, столярные плиты, опилкобетон, ксилолит, клееные изделия, щитовой паркет, дрань, лигноуглеводные древесные пластики, королит, блоки из сучков, плиты из цельной коры, выгорающие добавки, пластифицирующие добавки, отделочные материалы, кровельный картон и т.д.
Отходы промышленности строительных материалов: цементная пыль, каменная пыль, крошка, кирпичный бой, бракованный и старый бетон	Портландцемент, заполнители для бетона, минеральный наполнитель, добавки, смешанные вяжущие вещества и т.д.
Пиритные огарки	Портландцемент (корректирующая добавка)
Электротермофосфорные шлаки	Портландцемент (компонент сырьевой смеси), ШПЦ, сульфатостойкий ШПЦ, литой щебень, шлаковая пемза, стеновая керамика (компонент шихты)
Прочие отходы и вторичные ресурсы: стекольный бой и отходы стекла, макулатура, тряпье, изношенные шины и т.д.	Стекло, наполнитель для асфальта, добавка при производстве стеновой керамики, пористый заполнитель для бетона, кровельный картон, изол, фольгоизол и т.д.

### 3. ПРИРОДНЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Природные каменные материалы и изделия получают путем механической обработки горных пород, т.е. дробления, раскалывания, распиловки, отески, шлифовки (щебень, плиты и т.д.).* Сырьем для получения природных каменных материалов служат горные породы, физико-механические и химические свойства которых в основном не изменяются в процессе механической обработки и, следовательно, определяют свойства соответствующих материалов.

Природные каменные материалы очень прочны, долговечны, огнестойки, обладают прекрасными декоративными свойствами. В наше время природные плотные каменные материалы, как правило, уже не используются для возведения стен, арок, куполов, колонн и других несущих и ограждающих конструкций, т.к. эти материалы трудоемки в обработке, обладают большой массой и высокой теплопроводностью. Но из-за положительных эксплуатационных и эстетических качеств продолжают широко применяться для облицовочных работ, устройства полов, дорожных покрытий и пр. Пористые природные материалы применяются в конструкциях стен жилых и общественных зданий в виде стеновых камней и блоков. Грубообработанные каменные материалы и соответствующие горные породы широко используются в качестве заполнителей для бетонов, изготовления других искусственных каменных изделий на минеральных и органических вяжущих.

#### 3.1. Классификация природных каменных материалов

По **виду и степени обработки** различают *грубообработанные* материалы (бутовый камень, щебень, гравий, песок) и *профилированные* изделия (изделия и профилированные детали из природного камня; штучный камень и блоки правильной формы; плиты для наружной и внутренней облицовки зданий, полов; изделия для дорожного строительства и т.п.).

По **способу изготовления** природные каменные материалы и изделия можно разделить: на *пиленые*, полученные абразивной обработкой (стеновые камни и блоки, облицовочные плиты и плиты для пола), и *колотые*, полученные ударной обработкой (бортовые камни, камни тесаные, брусчатка, шашка для мощения и др.).

Используя ударную и абразивную обработку, природному камню придают ту или иную фактуру - различный характер поверхности.

*Ударная обработка* заключается в обкалывании поверхности камня с помощью камнетесного инструмента со сменными наконечниками: для тески пользуются широким долотом-скарпелью; скалывание неровностей производят спицей - остроконечным долотом; для чистой обработки лицевой поверхности применяют бучарду со средней или мелкой насечкой.

*Абразивная обработка* включает распиливание, фрезерование, шлифовку и полировку.

Выпиливание штучных стеновых камней и блоков из пористых пород производят камнерезными машинами. Режущими элементами машин являются дисковые пилы.

Для получения профилированных изделий (ступеней, поясков, карнизов и т.п.) на камнеобрабатывающих заводах применяют камнефрезерные и универсальные профилирующие машины.

Шлифовку и полировку производят на шлифовально-полировальных станках с вращающимися дисками, которые перемещают по поверхности изделия. Шлифуют с применением зернового абразива: корунда, карбокорунда или мелких пылевидных алмазов. После шлифовки камень имеет гладкую матовую поверхность. Полировка осуществляется войлочными полировальными дисками с использованием мастик и тонких полирующих порошков из оксидов металлов (хрома, олова, железа и др.) или азотно-кислого олова. После полировки поверхность плотного камня становится зеркально гладкой.

Абразивная обработка дает фактуры: *пиленую* - с тонкими штрихами и бороздками глубиной до 2 мм; *шлифованную* - равномерно шероховатую с глубиной рельефа до 0,05 мм; *лощеную* - гладкую бархатисто-матовую с выявленным рисунком камня; *зеркальную* - гладкую с зеркальным блеском.

Природные каменные материалы классифицируются также по **физико-техническим и эксплуатационным свойствам**.

По **плотности** природные камни делятся на легкие и тяжелые. Легкие камни плотностью не более  $1,8 \text{ г/см}^3$  имеют пористое строение (вулканический туф, пемза, известняк-ракушечник) и поэтому применяются преимущественно в виде штучного камня и блоков для стен зданий и щебня для легких бетонов. Тяжелые камни плотностью более  $1,8 \text{ г/см}^3$  (из гранита, сиенита, диорита и т.п.) служат облицовкой и используются в виде плит пола, материалов и изделий для гидротехнического и дорожного строительства.

По **пределу прочности при сжатии** образцов в воздушно-сухом состоянии природные каменные материалы делят на марки (МПа): 0,4; 0,7; 1,5; 2,5; 3,5; 7,5; 10; 12,5; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 80 и 100. Марки с 0,4 до 20 свойственны легким камням различной пористости.

По **морозостойкости** природные каменные материалы разделяют на марки: *F 10; F 15; F 35; F 100; F 150; F 200; F 300 и F 500*. Высокую морозостойкость имеют плотные камни с равномерно-зернистой структурой. Свежедобытые известняки, доломиты, песчаники, туфы легко разрушаются от мороза вследствие того, что их поры заполнены «горной влагой» и коэффициент насыщения пор водой близок к 1. После естественной просушки они оказываются достаточно морозостойкими и более прочными.

По **водостойкости** природные камни делятся на группы с коэффициентом размягчения не ниже 0,6 для наружных стен зданий; не ниже 0,8 – для гидротехнических сооружений и фундаментов.

В зависимости от назначения и условий применения природные каменные материалы оценивают также по твердости, истираемости и износу, огнестойкости, стойкости к химическому воздействию внешней среды и т.п.

### 3.2. Виды и свойства природных каменных материалов

**Грубообработанные каменные изделия.** *Бутовый камень (бут)* – куски камня неправильной формы, размером не более 50 см по наибольшему измерению. Бутовый камень может быть рваный (неправильной формы) и постелистый. Бутовый камень получают разработкой местных осадочных и изверженных пород, отвечающих проектным требованиям в отношении прочности, морозостойкости, водостойкости. Бут из осадочных пород (известняков, доломитов, песчаников) не должен содержать крупных включений глины, рыхлых прослоек и включений пирита.

Из бута возводят плотины и другие гидротехнические сооружения, его применяют для подпорных стенок, кладки фундаментов. Большое количество бутового камня перерабатывается в щебень.

*Щебень* – остроугольные куски камня размером 5-70 мм (для гидротехнического строительства до 150 мм). Получают его дроблением бутового камня и крупного гравия (валунного камня). Для обеспечения нужного зернового состава щебня процесс дробления осуществляют в несколько стадий. Встречается и природный щебень, называемый дресвой.

*Гравий* состоит из окатанных зерен тех же размеров, что и у щебня. Его получают просеиванием рыхлых осадочных пород.

*Песок* состоит из зерен различных минералов (кварца, полевого шпата, слюды и др.) с размерами 0,14-5 мм. Применяют природные и искусственные (дробленые) пески.

Щебень, гравий и песок используют в качестве заполнителей для бетонов. Предприятия-поставщики на эти материалы должны выдавать сертификат радиационно-гигиенической оценки о содержании естественных радионуклидов.

**Стеновые изделия.** Стеновые камни получают из туфов и пористых известняков путем выпиливания механизированным способом из массива горной породы или распиловки блоков-заготовок. Камни применяют для кладки наружных и внутренних стен и перегородок.

Основные размеры стеновых камней: 390×190×188; 490×240×188; 390×190×288 мм. Каждый такой камень заменяет в кладке 8-12 кирпичей. Для наружных стен применяют камни плотностью не более 2300 кг/м<sup>3</sup>. Водопоглощение камня должно быть не более 30 %, морозостойкость – не

менее  $F 15$ . Стены из мелкопористого природного камня не требуют наружной штукатурки или облицовки.

**Камни и плиты для облицовки.** Для облицовки гидротехнических сооружений, набережных, устоев мостов, цокольной части монументальных зданий применяют камни и плиты из гранита и других изверженных пород, которым свойственны высокая морозостойкость, прочность и твердость. Наружная облицовка зданий может выполняться из атмосферостойких осадочных пород (известняков, доломитов, песчаников, туфов), которые легче поддаются обработке и экономичнее гранитных пород. Для внутренней облицовки общественных зданий и сооружений (например, станций метрополитена) широко используют плиты, получаемые из хорошо распиливаемых пород: мрамора, ангидрида, гипса.

*Камни* для облицовки могут быть плитообразные (толщиной 15-25 см), утолщенные пирамидального вида (толщиной 30 см и более). *Плиты* для наружной облицовки имеют толщину 4-8 см, для внутренней – 1,2-4 см. Применение алмазных резцов позволяет изготавливать тонкие (5-10 мм) экономичные плиты, стоимость которых в 2-4 раза ниже, чем обычных. Тонкие плиты широко применяются, особенно для внутренней облицовки.

*Специальные облицовки* применяют для защиты от коррозии и действия высоких температур.

*Цокольные плиты*, а также детали карнизов, поясков и других выступающих частей сооружений изготавливают из стойких пород. Эти изделия не должны иметь волосных трещин, им придается такая форма, чтобы на них не задерживалась вода от дождя и тающего снега.

*Плиты для полов и ступеней* внутренних лестниц должны иметь высокие износостойкость и декоративные свойства, соответствующие архитектуре интерьера.

**Камни для гидротехнических сооружений.** Природные каменные материалы применяют в больших количествах для гидротехнических сооружений. В зоне переменного уровня воды условия службы материала особенно неблагоприятны: камень испытывает многократное замораживание и оттаивание в насыщенном водой состоянии. Защитную облицовку в этой зоне устраивают из плотных изверженных пород, имеющих водопоглощение не более 1 %, марку по прочности – не ниже 80-100 МПа и по морозостойкости –  $F 150-F 500$  в зависимости от класса сооружения, климатических и других условий эксплуатации. Соответствующим требованиям должны удовлетворять и материалы для каменных набросных плотин. Внутренние части набросок можно сделать из камня, полученного из осадочных пород марок 30-60 МПа с коэффициентом размягчения не менее 0,7-0,8.

**Дорожные каменные материалы.** *Бортовые камни*, отделяющие проезжую часть дороги от тротуара, изготавливают из плотных изверженных

пород (гранита, диабаз и т.п.), отличающихся высокой морозо- и износостойкостью и прочностью. Бортовые камни бывают прямые и лекальные, высокие - до 40 см и низкие - до 30 см. Эти камни применяют вместо бетонных при соответствующем технико-экономическом обосновании.

*Брусчатка* для мощения дорог имеет форму бруска, слегка суживающегося книзу. Брусчатку изготавливают механизированным способом из однородных мелко- и среднезернистых пород (диабаз и др.). Из таких пород изготавливают шашку для мозаичной мостовой (приближающуюся по форме к кубу) и шашку для мощения (в виде усеченной пирамиды).

*Тротуарные плиты* изготавливают из гнейсов и подобных им слоистых горных пород. Они имеют форму прямоугольной или квадратной плиты со стороной 20-80 см с ровной поверхностью, толщиной не менее 4 см и не более 15 см.

**Каменные кислотоупорные изделия.** Некоторые магматические и метаморфические (кварциты) горные породы используют для футеровки разнообразных установок и аппаратов, подвергающихся действию кислот, щелочей, солей и агрессивных газов, а также испытывающих влияние высоких и резко меняющихся температур и давлений. Кислотоупорные породы идут на изготовление тесаных плит, кирпичей, брусков и фасонных изделий, а в дробленном и размолотом виде служат в качестве заполнителей и наполнителей в кислотоупорном бетоне, являются составными частями кислотоупорных цементов.

В соответствии с назначением применяемые горные породы должны удовлетворять определенным требованиям, а именно: быть кислотоупорными, т.е. хорошо сопротивляться воздействию различных кислот и других реагентов – это свойство оценивается по растворимости порошка породы в концентрированных кислотах (соляной, серной) при нагревании; иметь высокую огнеупорность; обладать достаточным сопротивлением сжатию и изгибу, а также вязкостью; выдерживать резкие колебания температур.

Из изверженных горных пород кислотоупорными являются главным образом кислые мелкокристаллические, к которым относятся бештаунит, андезит, гранит и некоторые туфы, а из метаморфических - кварцит.

Применение кислотоупорного штучного камня ограничено его высокой стоимостью, обусловленной трудностью добычи и обработки, а также малым выходом готовой продукции из горной массы. Полноценным заменителем камня служит значительно более дешевый кислотоупорный бетон. Со штучным тесаным камнем соперничает также искусственный литой камень (базальтовый, диабазовый).

### **3.3. Предохранение каменных материалов от разрушения**

Основные причины разрушения природных каменных материалов в сооружениях: замерзание воды в порах и трещинах, вызывающее внутрен-



ние напряжения; частое изменение температуры и влажности, вызывающее появление в материале микротрещин; растворяющее действие воды и понижение прочности при водонасыщении; химическая коррозия, происходящая под действием газов, содержащихся в атмосфере ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и др.), и веществ, растворенных в грунтовой или морской воде.

*Конструктивную защиту* открытых частей сооружений (цоколей, карнизов, поясков, столбов, парапетов) сводят к приданию им такой формы, которая облегчает отвод воды. Этому же способствует гладкая полированная поверхность облицовки и профилированных деталей.

Для пористых каменных материалов, которые не полируются, используют *химическую защиту*, например, путем пропитки поверхностного слоя уплотняющими составами и нанесения на лицевую поверхность гидрофобизирующих (водоотталкивающих) составов. *Кремнефторизацию* (или *флюатирование*) применяют для повышения стойкости наружной облицовки и других материалов, полученных из карбонатных пород. При пропитывании известняка раствором флюата (соли кремнефтористоводородной кислоты) происходит химическая реакция



Полученные нерастворимые в воде вещества  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$  и  $\text{SiO}_2$  отлагаются в порах и уплотняют лицевой слой камня. В результате этого уменьшается его водопоглощение и возрастает морозостойкость; облицовка из камня меньше загрязняется пылью.

Некарбонатные пористые каменные материалы предварительно обрабатывают водными растворами кальциевых солей (например,  $\text{CaCl}_2$ ), а после этого пропитывают флюатами.

*Гидрофобизация*, т.е. пропитка гидрофобными составами (например, кремнийорганическими жидкостями), понижает проникновение влаги в пористый камень, в частности при капиллярном подсосе. Для защиты камня от коррозии применяют пленкообразующие полимерные материалы – прозрачные и окрашенные. Также пропитывают поверхность камня мономером с последующей его полимеризацией.

## 4. ОБЖИГОВЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 4.1. Керамические материалы и изделия

*Керамическими* (от греческого «керамос» – глина) называют искусственные каменные материалы и изделия, получаемые высокотемпературным обжигом глин с минеральными добавками.

**Классификация керамических изделий.** По структуре черепка различают: а) *плотные* изделия со спекшимся черепком (материал, из которого состоят керамические изделия после обжига, в технологии керамики называют керамическим черепком) и водопоглощением менее 5 % (плитки для полов и облицовки фасадов, клинкерный кирпич); б) *пористые* изде-

ля с водопоглощением более 5 % (стенные, плитки внутренней облицовки стен).

По назначению различают керамические изделия: для стен (кирпич и керамические камни); облицовки фасадов (лицевой кирпич и камни); плитки для внутренней облицовки стен и полов; кровельные (черепица); санитарно-техническое оборудование (изделия из фаянса); дорог и подземных коммуникаций (дорожный кирпич, трубы и т.п.); теплоизоляции (легкий кирпич, фасонные изделия); кислотоупорные изделия (кирпич, плитки, трубы и т.п.); огнеупоры; заполнители для легких бетонов (керамзит, аглопорит).

**Сырье для производства керамических изделий.** Основным сырьевым материалом для производства строительных керамических изделий является глинистое сырье, применяемое в чистом виде, а чаще в смеси с добавками – отошающими, пластифицирующими, порообразующими, плавнями и др.

**Основные свойства глин как сырья для производства керамики:** пластичность и связность глиняного теста, способность отвердевать при высыхании и переходить в необратимое камневидное состояние при обжиге.

*Пластичность* глин обеспечивается содержанием в них глинистых частиц пластинчатой формы размером 0,005 мм и менее. Наличие между этими частицами тонких слоев воды за счет действия молекулярных и капиллярных сил обеспечивает связность частиц и способность их к скольжению относительно друг друга без потери связности.

При сушке глиняное тесто теряет воду и уменьшается в объеме. Этот процесс называется *воздушной усадкой* (2-12 % по объему). При этом глина затвердевает, но при добавлении воды вновь переходит в пластичное состояние. При обжиге при температуре около 1000 °С керамическая масса безвозвратно теряет свои пластические свойства и за счет образования новых минералов приобретает камневидное состояние, водостойкость и прочность. Одновременно с этим происходит дальнейшее уплотнение и усадка материала, которая называется *огневой усадкой* (2-8 %). Способность глин уплотняться при обжиге и образовывать камнеподобный черепок называется *спекаемостью глин*. В зависимости от температуры обжига получают пористый (около 1000 °С) или спекшийся (более 1100 °С) черепок.

**Основные виды керамических изделий** – это стеновые изделия, облицовочные материалы и изделия, керамические материалы и изделия специального назначения.

**Стеновые изделия.** В группу стеновых керамических материалов входят кирпич (одинарный, утолщенный, модульных размеров) и камни, изготавливаемые способом полусухого прессования или пластического формования, а также крупноразмерные блоки и панели. Кирпич керамический

одинарный имеет форму прямоугольного параллелепипеда с ровными гранями, прямыми ребрами и углами размерами 250×120×65 мм; утолщенный – размерами 250×120×88 мм. Кирпич может выпускаться полнотелым (без пустот и с технологическими пустотами в количестве не более 13 %) и пустотелым (с вертикальным или горизонтальным расположением пустот), а камни – только пустотелыми. Плотность кирпича и камней в зависимости от наличия и количества пустот находится в пределах от 1400 до 1900 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность – от 0,4 до 0,8 Вт/(м · °С). По этим показателям пустотелые кирпич и камни, а также пористо-пустотелый кирпич (в состав керамической массы вводят выгорающие добавки) относятся к группе эффективных стеновых керамических изделий. Причем эти виды кирпича и камней подразделяют на условно-эффективные, улучшающие теплотехнические свойства стен, и эффективные, позволяющие значительно уменьшить толщину стен.

Марку камней по *прочности* определяют в зависимости от значений предела прочности при сжатии, а для кирпича – и с учетом предела прочности при изгибе. Марки по прочности полнотелого кирпича, а также пустотелых кирпича и камней с вертикальным расположением пустот – 75, 100, 125, 150, 175, 200, 250 и 300, а с горизонтально расположенными пустотами – 25, 35, 50, 100. Марки кирпича и камней по *морозостойкости* – *F* 15, *F* 25, *F* 35, *F* 50. *Водопоглощение* не должно быть для полнотелого кирпича менее 8 %, для пустотелых изделий – менее 6 %. *Масса* кирпича в высушенном состоянии не должна быть более 4,3 кг, камней – не более 16 кг.

Эти изделия применяются для кладки наружных и внутренних стен, кладки фундаментов (из полнотелого кирпича).

**Облицовочные материалы и изделия.** Различают: фасадные облицовочные изделия – кирпич и камни керамические лицевые (укладывают в стену здания в перевязку с обыкновенными, они отличаются от последних повышенными физико-механическими показателями и улучшенными показателями внешнего вида); керамические изделия для внутренней облицовки – плитки для внутренней облицовки стен (применяют в помещениях санузлов, кухонь, бань, прачечных, станций метро и т.п.); плитки для полов. Величина основного, помимо *размеров и внешнего вида*, нормируемого показателя для керамических плиток – *водопоглощения* – имеет значение при выборе материала для облицовки помещений с влажным режимом и плиток для полов. При обычных условиях эксплуатации (внутри помещений) этот параметр не оказывает заметного влияния на потребительские свойства керамической плитки. Совершенно иная ситуация складывается при использовании плитки вне помещения: *морозостойкость* керамических изделий напрямую зависит от водопоглощения. Считается, что плитка с водопоглощением менее 3 % пригодна для применения на улице (крыльцо, балкон и т.п.) или в неотапливаемых помещениях. Керамические плит-

ки для улучшения внешнего вида и создания дополнительной защиты покрывают *глазурью*.

*Керамический гранит* принадлежит к тому же классу отделочных материалов, что и керамическая плитка, но отличается от нее повышенными механическими характеристиками (прочностью, твердостью и износостойкостью), а также текстурой, имитирующей природный камень. Этот комплекс свойств достигается в результате применения смеси глин и минеральных добавок, сходной по составу с фарфоровой массой. Плитки, отформованные из этой смеси под высоким (до 50 МПа) давлением, подвергаются высокотемпературному обжигу (более 1200 °С), что приводит к спеканию массы и обеспечивает получение чрезвычайно твердого и плотного черепка, практически лишенного пор и пустот. Это позволяет обходиться без нанесения на поверхность плитки защитного слоя глазури.

Керамические плитки и керамогранит производятся размеров: от 15×15 до 40×40 и 30×60 см. Толщина облицовочных плиток обычно 5; 6 мм; плиток для полов и керамогранита – 8,5; 12; 15 мм.

**Керамические материалы и изделия специального назначения.** Выпускают кирпич и камни керамические для кладки и футеровки промышленных дымовых труб и печей; камни трапецеидальной формы для устройства подземных коллекторов; дорожный клинкерный кирпич для мощения улиц и дорог, полов, облицовки набережных и т.п.; глиняную черепицу – старейший вид кровельных материалов; керамические трубы: канализационные (с плотным черепком) и дренажные (с пористым черепком); теплоизоляционные керамические изделия – ячеистая керамика, керамзит; огнеупорные материалы (изготавливают в виде кирпича, блоков, плит из различных сырьевых компонентов по технологии, близкой к керамической).

## 4.2. Стекло и изделия из минеральных расплавов

### 4.2.1. Стекло и изделия из стекла

*К строительным стеклам относятся материалы и изделия из силикатных расплавов, полученные в результате переохлаждения последних.*

Основные сырьевые материалы для получения стекла: кварцевый песок, сода, известняк, сульфат натрия. В производстве стекла используют чистые кварцевые пески с небольшим количеством железа. Из расплава смеси кварцевого песка и соды (сода уменьшает температуру плавления) получают стеклообразное вещество, растворимое в воде (растворимое стекло). Известняк и доломит в составе сырьевой смеси придают стеклу нерастворимость в воде. Кроме того, в сырьевую смесь добавляют осветлители, глушители (для получения непрозрачного стекла).

**Свойства строительного стекла.** Плотность стекла равна 2,5 г/см<sup>3</sup>. Стекло обладает высокой прочностью на сжатие, малой ударной прочно-

стью, имеет относительно невысокую теплопроводность (0,7-0,8 Вт/м · °С) вследствие аморфной структуры. Важнейшее свойство стекла – светопропускание – находится на уровне 88-90 %. Стекло имеет химическую стойкость к большинству агрессивных веществ за исключением плавиковой и фосфорной кислот и является долговечным материалом.

**Основные виды листового стекла.** *Оконное* (обычное) стекло выпускают толщиной от 2 до 6 мм. Сорт стекла зависит от наличия дефектов (волнистость, газовые пузыри и т.д.). Оконное стекло пропускает видимые и инфракрасные лучи и плохо пропускает ультрафиолетовое излучение.

*Теплоотражающее и низкоэмиссионное* стекло получают путём нанесения на поверхность тонких плёнок металлов или оксидов. С внешней стороны эти стёкла имеют разные цвета (голубой, золотистый). При этом теплоотражающее стекло не пропускает большую часть инфракрасного излучения внутрь помещения, что необходимо для жарких южных районов. Низкоэмиссионное стекло, напротив, отражает тепло внутрь помещения, что позволяет существенно экономить на отоплении (по сравнению с обычным стеклом).

*Теплопоглощающее* стекло имеет в своем составе добавки кобальта, железа и др. Оно поглощает большую часть инфракрасного излучения, при этом саморазогреваясь, что требует больших зазоров при установке. Имеет синий или зеленоватый оттенок.

*Увиолевое* стекло получают из шихты с минимальными примесями оксидов железа, хрома. Пропускает больше ультрафиолетовых лучей, чем обычное стекло. Применяют в больницах, санаториях.

*Светорассеивающие* стёкла: матовые и узорчатые. Матовое стекло получают за счёт пескоструйной обработки обычного листового стекла, а узорчатое – способом проката.

*Армированное* стекло получают путём армирования сеткой из стальной проволоки. Будучи запрессованной в стекло металлическая сетка служит каркасом, удерживающим мелкие осколки стекла при его повреждении.

К *безопасным стеклам* относят закалённое и многослойное стекло. *Закалённое* или *молированное* (упрочненное безопасное) стекло получают путём нагрева при температуре около 1500 °С и быстрого охлаждения, при этом стекло получает в 3-4 раза большую ударную прочность. Нередко молированное стекло делают изогнутым – для придания определенных эстетических качеств. *Многослойное* или *слоистое* стекло (триплекс) включает полимерную плёнку, которая предотвращает появление осколков.

**Изделия из стекла.** *Стеклопакет* представляет собой единый неразборный блок из двух или нескольких стёкол, соединенных между собой с герметически замкнутыми прослойками, заполненными сухим воздухом или, что лучше, инертным газом для более высоких теплозвукоизолирующих свойств. Внутри конструкции находится адсорбирующий порошок

(обычно технический силикагель или гранулированный цеолит), который исключает образование конденсата на внутренних поверхностях стекол. Стеклопакеты, состоящие из двух листов стекла, называются однокамерными, их трех – двухкамерными и т.д. Толщина одно- или двухкамерного стеклопакета составляет 30-50 мм.

*Стеклоблоки* получают путём сварки двух половинок (как правило, из узорчатого стекла). Для них характерны высокая прочность, теплозащитные свойства, светорассеивание.

*Профильное стекло (стеклопрофилит)* – это изделия таврового, швеллерного, коробчатого профилей. Применяются для заполнения больших проемов, а также монтажа стен, перегородок, покрытий.

#### 4.2.2. Изделия из минеральных расплавов

**Ситаллы** – это стеклокристаллические материалы, получаемые из силикатного расплава путем направленной кристаллизации за счет добавок титана, циркония, лития. Последние позволяют получать в структуре ситалла мельчайшие равномерно распределенные кристаллы, соединенные прослойками стекла (5-10 % по объему). Ситаллы представляют собой тонкозернистые материалы с очень высокими физико-механическими свойствами. Один из видов ситалла – *шлакоситалл* – получают на основе доменных шлаков. Этот материал обладает высокой прочностью (в том числе ударной), диэлектрической непроницаемостью, химической стойкостью, малыми температурными деформациями, износостойкостью. Применяют для фундаментов машин, подоконников, ступеней, облицовочных плит, полов химических производств и труб для агрессивных сред.

**Литые каменные изделия** изготавливают из расплавов магматических горных пород – базальта, диабазы (темное литье), а также карбонатных горных пород – доломита, известняка, мрамора, кварцевого песка (светлое литье). Изделия обладают высокой плотностью, прочностью, химической стойкостью и, в том числе, кислотостойкостью. Получают плотные каменные изделия (облицовочные плитки для предприятий химической промышленности, мелкоштучные дорожные изделия – брусчатка, бордюрный камень), а также волокнистые материалы (минеральная вата и изделия из нее) и др.

### 5. МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

#### 5.1. Классификация и основные виды минеральных вяжущих

*Минеральные (неорганические) вяжущие вещества представляют собой искусственные тонкоизмельченные порошки, способные при смешивании с водой (в отдельных случаях с растворами некоторых солей) образовывать пластично-вязкую массу (тесто вяжущего), которая в результа-*

*те физико-химических процессов постепенно затвердевает и переходит в камневидное тело.*

Неорганические вяжущие вещества в зависимости от их способности твердеть и сохранять свою прочность в определенной среде делят на воздушные, гидравлические и кислотостойкие. *Воздушные* вяжущие (гипсовые и ангидритовые вяжущие, известь воздушная, магнезиальные вяжущие, растворимое стекло) твердеют и длительно сохраняют прочность лишь в воздушной среде. Вяжущие вещества, способные твердеть и длительно сохранять или повышать прочность не только на воздухе, но и еще лучше в воде, называют вяжущими *водного твердения* или *гидравлическими* (гидравлическая известь, портландцемент и его разновидности, глиноземистый и расширяющий цементы, шлаковые вяжущие вещества). В отдельную группу *кислотостойких* вяжущих входит кислотоупорный кварцевый цемент.

В самостоятельную группу часто выделяют вяжущие вещества *автоклавно*го твердения (известково-кремнеземистые, известково-нефелиновые, известково-шлаковые), хотя по существу они относятся к гидравлическим вяжущим.

Почти все минеральные вяжущие получают обжигом горных пород с последующим тонким помолом продукта обжига. Твердение минеральных вяжущих происходит в результате их взаимодействия с водой (реакций гидратации). Условно принято различать два периода в процессе твердения вяжущего вещества – схватывание и собственно твердение. Момент, когда пластичное тесто вяжущего начинает загустевать и теряет пластичность, соответствует началу схватывания. Далее тесто вяжущего все больше и больше уплотняется, полностью загустевает и постепенно превращается в твердое каменное тело, не обладающее еще заметной прочностью. Этот момент считают концом схватывания. Прочность вяжущих изменяется во времени, поэтому оценивают вяжущие по прочности, набранной за определенное время твердения в условиях, установленных стандартом. Этот показатель принимают за марку вяжущего.

## 5.2. Гипсовые и ангидритовые вяжущие вещества

**Гипсовые вяжущие** – это порошкообразные материалы, состоящие из полуводного гипса ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) и получаемые тепловой обработкой при температуре в пределах 105-180 °С природного двуводного гипса ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) или гипсодержащих техногенных отходов (вторичных ресурсов).

При термообработке двуводного гипса в паровой среде под давлением в автоклавах или в водных растворах некоторых солей при атмосферном давлении образуется  $\alpha$ -полуводный сульфат кальция (*гипсовое вяжущее  $\alpha$ -модификации*). При обжиге сырья при 130-180 °С получают  $\beta$ -полуводный сульфат кальция (*гипсовое вяжущее  $\beta$ -модификации*). Модификации

полуводного гипса отличаются размерами и формой кристаллов:  $\alpha$ -модификация имеет более крупные кристаллы без пустот и пор;  $\beta$ -модификация – бесформенные кристаллы, в которых много пор. Вследствие этого гипсовое вяжущее  $\alpha$ -модификации имеет меньшую водопотребность, а затвердевший гипс из  $\alpha$ -полугидрата приобретает повышенную плотность и прочность по сравнению с  $\beta$ -полугидратом.

Гипсовые вяжущие по традиции с некоторой условностью, отвечающей практическим целям, разделяют: на строительный гипс, состоящий из  $\beta$ -полугидрата; формовочный гипс того же состава с повышенными техническими свойствами; высокопрочный гипс, состоящий из  $\alpha$ -полугидрата.

**Твердение гипсовых вяжущих.** При твердении идет реакция гидратации  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O} + 1,5\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Существует три основные теории твердения минеральных вяжущих, в том числе и гипсовых: Ле-Шателье, Михаэлиса, Байкова. Наиболее часто твердение полуводного гипса описывают *кристаллизационной* теорией Ле-Шателье. Согласно этой теории полуводный гипс, обладая достаточно высокой растворимостью в воде (8 г/л), присоединяет воду в растворе и превращается в двуводный гипс, который имеет меньшую растворимость (2 г/л) и выпадает в виде осадка из раствора. При этом раствор по отношению к полуводному гипсу вновь становится ненасыщенным, что вызывает растворение новых порций гипса. По мере увеличения количества кристаллов новой фазы они срастаются между собой, образуя кристаллический «сросток», являющийся основой твердеющей системы.

**Свойства применение гипсовых вяжущих.** Гипсовые вяжущие различают по *тонкости помола*. Существуют следующие индексы помола: I – грубый; II – средний; III – тонкий. С увеличением тонкости помола качественные показатели гипсовых вяжущих улучшаются.

**Водопотребность** – это количество воды затворения, которое необходимо для получения теста нормальной густоты. Водопотребность определяется по радиусу расплыва лепешки. Для реакции гидратации требуется лишь 18,6 % воды. Остальная вода, испаряясь, оставляет поры, поэтому снижается прочность затвердевшего материала. Гипсовые вяжущие, состоящие из  $\beta$ -модификации полуводного гипса, имеют высокую водопотребность (обычно 50-70 %). Водопотребность гипсовых вяжущих, состоящих из  $\alpha$ -модификации полуводного гипса, значительно меньше – 35-45 %. Поскольку  $\alpha$ -модификация (высокопрочный гипс) требует меньше воды для затворения, чем  $\beta$ -модификация (строительный гипс), то пористость затвердевшего материала в первом случае меньше, а прочность больше, чем во втором. В остальном свойства этих вяжущих практически одинаковы.

**Сроки схватывания.** Различают три вида гипсовых вяжущих по срокам схватывания: А – быстротвердеющий – не ранее 2 и не позднее 15 мин; Б – нормальнотвердеющий – не ранее 6 и не позднее 30 мин; В – медлен-



нотвердеющий – не ранее 20 мин, конец схватывания не нормируется. Быстрое схватывание гипсовых вяжущих является во многих случаях положительным их свойством, позволяющим быстро извлекать изделия из форм. Однако нередко быстрое схватывание нежелательно. Для регулирования сроков схватывания (ускорения и замедления) в гипсовые вяжущие при затворении вводят различные добавки. В частности замедлителями схватывания являются добавки ПАВ (поверхностно-активных веществ).

**Прочность.** Определяется испытанием изготовленных из гипсового теста нормальной густоты образцов-балочек размером 4×4×16 см в возрасте 2-х часов на изгиб, а их половинок – на сжатие. В зависимости от предела прочности при сжатии и изгибе определяют марку гипсовых вяжущих: Г2, Г3, Г4, Г5, Г6, Г7, Г10...Г25 (цифра в обозначении марки показывает минимальную прочность на сжатие в МПа). При высыхании гипсовые изделия становятся прочнее примерно в 2 раза.

При увлажнении прочность затвердевшего гипса и изделий из него снижается. Изделия из гипса неводостойкие (коэффициент размягчения гипса колеблется в пределах 0,3-0,45 и зависит главным образом от его средней плотности). Водостойкость повышается: 1) применением интенсивных способов уплотнения жестких гипсобетонных смесей при формировании; 2) нанесением покровных пленок или пропитыванием изделий уплотняющими или гидрофобными веществами; 3) применением смешанных гипсовых вяжущих, которые являются более водостойкими (например, гипсоцементнопоццолановые вяжущие – ГЦПВ).

Гипсовые вяжущие применяют для получения гипсокартонных и гипсоволокнистых листов, а также облицовочных изделий, вентиляционных коробов, плит для перегородок и т.п., используемых в конструкциях зданий и сооружений при относительной влажности воздуха не более 60 %; при условии повышения водостойкости – для элементов наружных стен малоэтажных зданий.

**Ангидритовые вяжущие** состоят в основном из ангидрита – безводного сульфата кальция  $\text{CaSO}_4$ . В отличие от полуводного гипса они медленно схватываются и твердеют, но их прочность и водостойкость выше. Различают ангидритовое вяжущее (ангидритовый цемент) и высокообжиговый гипс (эстрихгипс).

*Ангидритовое вяжущее* получают обжигом гипсового сырья при 600-750 °С и последующим тонким помолом продукта обжига с добавками катализаторов в количестве 5-7 % (извести, обожженных доломитов и т.д.) или одним только измельчением природного ангидрита с указанными добавками. Ангидритовое вяжущее состоит в основном из нерастворимого ангидрита, который с водой практически не взаимодействует. В присутствии указанных добавок-активизаторов ангидрит приобретает способность к взаимодействию с водой и твердению.

Начало схватывания ангидритового цемента наступает не ранее 30 мин, конец – не позднее 24 ч; предел прочности при сжатии через 28 суток твердения на воздухе составляет 10-20 МПа.

*Высокообжиговый гипс* получают путем тонкого помола продукта обжига двуводного природного гипса до температуры 800-950 °С, когда добавка-активизатор (СаО) возникает в обжигаемом сырье за счет термической диссоциации сульфата кальция. Начало схватывания теста из высокообжигового гипса наступает не ранее 2 ч, но его можно ускорить добавками, например  $\text{NH}_4\text{SO}_4$ ; прочность при сжатии такая же, как у ангидритового цемента (через 28 суток 10-20 МПа).

Ангидритовые вяжущие применяют при устройстве бесшовных полов, в растворах для штукатурки (в том числе наружной), для изготовления искусственного мрамора.

### 5.3. Воздушная строительная известь

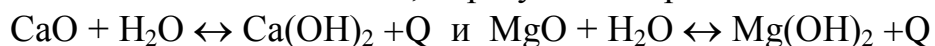
*Строительной воздушной известью называют вяжущее, состоящее в основном из активных оксидов кальция и магния и получаемое обжигом при температуре 900-1200 °С кальцево-магниевого карбонатных горных пород, содержащих не более 6-8 % глинистых и песчаных примесей.* Основное сырье для получения извести – плотный известняк, а также мел.

**Виды строительной извести.** Различают *негашеную* (состоящую в основном из оксидов кальция и магния) и *гашеную* (состоящую из соответствующих гидроксидов) известь. Непосредственно после обжига получают *негашеную комовую* известь. Основные реакции, происходящие при обжиге известняка:  $\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$  и  $\text{MgCO}_3 \leftrightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2 \uparrow$ .

Получаемая в виде кусков комовая известь представляет собой состоящий из мелких кристаллов (0,5 – 2 мкм) оксида кальция и частично магния пористый материал, что обуславливает его большую реакционную способность с водой. При нормальной температуре обжига чистого известняка до полного удаления  $\text{CO}_2$  (теоретически 44 %) его масса уменьшается почти в 2 раза, объем продукта – всего на 10-12 %. Комовую известь превращают в порошкообразное вяжущее двумя путями: механическим – размолотом в мельницах (*молотая негашеная известь*) или путем гашения водой (*гашеная известь*).

Молотая негашеная известь по химическому составу такая же как исходная комовая известь. При ее помоле разрешается вводить тонкомолотые минеральные добавки (шлак, золы, песок, пемзу, известняк и др.), которые улучшают свойства полученных известковых вяжущих.

Гашение заключается в том, что вода, соприкасаясь с кусками негашеной извести, поглощается ею и одновременно химически взаимодействует с оксидами кальция и магния, образуя их гидроксиды:



При гашении 1 кг извести-кипелки выделяется 1160 кДж тепла. При этом температура гасящейся извести может достигать таких значений, при которых возможно не только кипение воды, но и возгорание дерева. При гашении идет самопроизвольный распад кусков извести на мельчайшие частицы.

В зависимости от количества воды, взятой при гашении, можно получить *гидратную известь (пушонку)*, *известковое тесто* или *известковое молоко*. Теоретически для перевода оксида кальция в гидроксид необходимо около 30 % воды от массы извести-кипелки. На практике для получения извести-пушонки воды берут в 2-3 раза больше (60-80 %), так как при гашении часть ее испаряется. Известь-пушонка представляет собой тонкий белый порошок, объем которого в 2-3 раза превышает объем исходной извести-кипелки. Выдержанное известковое тесто получают в виде пастообразной концентрированной водной суспензии ( $\rho \approx 1400 \text{ кг/м}^3$ ), которая содержит около 50 % воды. Известковое молоко имеет вид жидкости плотностью менее  $1300 \text{ кг/м}^3$ .

В зависимости от *содержания оксида магния* различают виды воздушной извести: *кальцевую* (содержание MgO не более 5 %), *магнезиальную* (MgO – 5...20 %), *доломитовую* (MgO – 20...40 %).

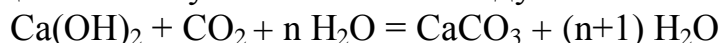
По *скорости гашения* воздушная известь бывает: *быстрогасящаяся* со временем гашения менее 8 мин, *среднегасящаяся* – от 8 до 25 мин и *медленногасящаяся* – более 25 мин. В зависимости от температуры, развивающейся при гашении, различают низкоэкзотермичную (температура гашения ниже 70 °C) и высокоэкзотермичную (температура гашения выше 70 °C) известь.

В зависимости от содержания свободных CaO и MgO, определяющих активность извести, содержания CO<sub>2</sub>, а также непогасившихся зерен негашеная известь делится на три, а гашеная на два сорта.

**Виды твердения воздушной строительной извести.** Различают два вида твердения извести: 1) карбонатное твердение; 2) гидратное твердение. *Карбонатное* твердение характерно для растворов и бетонов на гашеной извести и заключается в 2-х параллельно протекающих процессах (по времени):

а) испарении воды из раствора и кристаллизация извести. Кристаллы Ca(OH)<sub>2</sub> срастаются между собой, образуя "сросток", который является основой прочности камня;

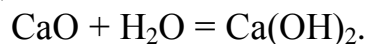
б) карбонизации за счет углекислоты из воздуха:



Карбонизация дает дополнительный прирост прочности, так как CaCO<sub>3</sub> – малорастворимое в воде вещество. Процесс твердения идет очень медленно, так как структура из кристаллов Ca(OH)<sub>2</sub> – малопрочная, а карбонизация недостаточно эффективна из-за малой концентрации углекислоты.

го газа в атмосфере. Через месяц твердения на воздухе прочность достигает небольших значений порядка 0,5-1 МПа и только через годы – 5-7 МПа.

*Гидратное* твердение характерно для молотой негашеной извести. Оно заключается во взаимодействии негашеной извести с водой:



Условия гидратного твердения: а) тонкий помол извести; б) отвод излишнего тепла за счет применения холодной воды; химических добавок, замедляющих гашение и др.; в) прекращение перемешивания на определенном этапе; г) оптимальное количество воды затворения (в пределах от 100 до 150 %; если воды будет меньше 100 %, то произойдет гашение в пушонку; если больше 150 % – гашение в тесто). Эти условия позволяют кристаллам  $\text{Ca(OH)}_2$  быстро срастаться друг с другом с образованием твердеющей структуры. Кроме того, принципиальное отличие этого вида твердения от карбонатного состоит в том, что большое количество воды химически связывается, и это способствует большей плотности и прочности изделий по сравнению с получаемыми на гашеной извести. Карбонизация дополнительно повышает прочность изделий.

**Применение строительной извести.** Строительную воздушную известь применяют для получения: а) штукатурных и кладочных растворов (гашеная известь); б) местных известковых вяжущих веществ и низкомарочных бетонов и изделий из них, эксплуатируемых в воздушно-сухих условиях (на основе негашеной молотой извести); в) известково-песчаных (силикатных) изделий автоклавного твердения – силикатного кирпича, ячеистых силикатных бетонов (на основе гашеной и негашеной молотой извести). В последнем случае получают достаточно водостойкие материалы.

#### 5.4. Магнезиальные вяжущие вещества

*Магнезиальные вяжущие представляют собой воздушные вяжущие, состоящие в основном из оксида магния в виде каустического магнезита или каустического доломита и затворяемые водными растворами магнезиальных солей. Каустический магнезит  $\text{MgO}$  получают умеренным обжигом магнезита  $\text{MgCO}_3$  при температуре 700-800 °С и последующим помолом в тонкий порошок. Каустический доломит  $\text{MgO} \cdot \text{CaCO}_3$  изготавливают обжигом природного доломита  $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$  при 650-750 °С и последующим помолом в тонкий порошок. Поскольку каустический доломит кроме оксида магния, являющегося активной частью вяжущего, содержит в большом количестве карбонат кальция, который не обладает вяжущими свойствами, то активность каустического доломита ниже по сравнению с каустическим магнезитом.*

Каустический магнезит и доломит затворяют не водой, а водными растворами хлористого или серноокислого магния. В указанных растворах повышается растворимость оксида магния и резко ускоряется процесс

твердения. При этом наряду с гидратацией оксида магния происходит образование соответственно гидрооксихлорида или гидрооксисульфата магния и создаются условия для получения относительно высокой прочности затвердевшего камня (при сжатии 40-60 МПа – на каустическом магнезите и 10-30 МПа – на каустическом доломите).

Магнезиальные вяжущие характеризуются хорошим сцеплением с органическими материалами (древесные опилки, стружка и т.п.) и являются их «минерализаторами». На этом основано применение этих вяжущих для устройства ксилолитовых (ксилолит в переводе с греческого – «дерево-камень») полов, заполнителем в которых служат древесные опилки, а также плитного материала фибролита.

### 5.5. Портландцемент

**Общая характеристика и вещественный состав портландцемента.** Портландцемент был изобретен в 1824 году англичанином Джозефом Аспдиным и параллельно с ним русским промышленником Егором Челиевым. *Портландцемент – это гидравлическое вяжущее вещество, которое состоит на 70-80 % из высокоосновных силикатов кальция, получаемое обжигом при температуре 1450 °С сырьевой смеси известняка и глины с последующим помолом продукта обжига (клинкера) в тонкий порошок совместно с гипсом и минеральными добавками.*

Природный гипс добавляют к клинкеру при помоле в количестве 4-5 % от клинкера. Добавка гипса играет важную роль в качестве регулятора сроков схватывания. Без добавки гипса цемент будет очень быстро схватываться и иметь пониженную прочность.

При помоле клинкера в количестве до 20 % можно добавлять активные минеральные добавки. Используют добавки осадочного происхождения: диатомит, трепел (их можно вводить до 10 %); вулканического происхождения – вулканические пеплы, туфы, пемза (до 15 %), а также доменные гранулированные шлаки (до 20 %). В зависимости от содержания минеральных добавок портландцемент имеет обозначения: ПЦ-Д0 (без добавок), ПЦ-Д5 (до 5 % добавок), ПЦ-Д20 (до 20 % добавок).

**Химический состав портландцементного клинкера** выражают содержанием оксидов (по массе). Главными являются: CaO – 63-66 %, SiO<sub>2</sub> – 21-24 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4-8 % и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2-4 %, суммарное содержание которых составляет 95-97 %. В небольших количествах в составе различных соединений могут входить MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, играющие определенную роль в свойствах портландцемента.

**Минеральный состав клинкера** включает ряд искусственных минералов, образовавшихся при обжиге и состоящих из перечисленных выше оксидов. Ориентировочное содержание основных четырех минералов в клинкере составляет (в процентах по массе): алит 3CaO·SiO<sub>2</sub> (C<sub>3</sub>S) – 40...65, белит 2CaO·SiO<sub>2</sub> (C<sub>2</sub>S) – 15...40, трехкальциевый алюминат

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ) – 5...15, четырехкальцевый алюмоферрит  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) – 10...20.

*Алит*  $\text{C}_3\text{S}$  – главный минерал цементного клинкера – обладает большой активностью в реакции с водой. Алит быстро твердеет и набирает высокую прочность.

*Белит*  $\text{C}_2\text{S}$  – значительно менее активен, чем алит. Тепловыделение белита при полной гидратации примерно в два раза меньше, чем у алита, и к трем суткам составляет около 10 % от тепловыделения при полной гидратации. Твердение белита происходит медленно, к месячному сроку продукт его твердения обладает невысокой прочностью, но при длительном твердении (несколько лет) его прочность неуклонно возрастает и достигает высоких значений (при положительной температуре и влажной среде).

*Трехкальцевый алюминат*  $\text{C}_3\text{A}$  – самый активный клинкерный минерал, отличающийся быстрым взаимодействием с водой. При твердении в чистом виде он характеризуется низкими показателями прочности, но в сочетании с другими компонентами цементного клинкера и относительно небольшом содержании (5-12 %) этот минерал способствует быстрому росту прочности в первые сутки твердения цемента. Если не ввести добавку гипса в портландцемент, то быстрое твердение  $\text{C}_3\text{A}$  вызывает раннее структурообразование в цементном тесте и сильно ускоряет сроки схватывания (несколько минут); получается цемент – «быстряк», бетонные смеси на котором из-за преждевременного схватывания не успевают хорошо перемешать и уложить в форму, а бетон не набирает требуемой прочности.

*Четырехкальцевый алюмоферрит*  $\text{C}_4\text{AF}$  – характеризуется умеренным тепловыделением и по скорости твердения занимает промежуточное положение между трехкальцевым и двухкальцевым силикатами. Прочность продуктов его гидратации в ранние сроки ниже, чем у алита, но выше, чем у белита.

Помимо этих основных составляющих в клинкере содержатся также и некоторые другие кристаллические образования, в частности  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  в свободном состоянии, а также клинкерное стекло. Располагая данными о минеральном составе клинкера и зная свойства клинкерных минералов, можно заранее предопределить основные свойства цемента и особенности его твердения в различных условиях эксплуатации.

Нежелательными составными частями клинкера являются свободные оксиды кальция и магния, потому что они гидратируются очень медленно, в уже затвердевшем цементном камне, что вызывает в нем неравномерные деформации, ведущие к трещинам. Содержание  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  в свободном состоянии в клинкере допускаются не более 1 и 5 % соответственно.

В клинкере могут быть также щелочные оксиды  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ , перешедшие в него из сырьевых материалов и золы твердого топлива. Они вредят в том случае, если бетон изготовлен на заполнителях, содержащих аморфный кремнезем. Щелочи, реагируя с диоксидом кремния, образуют в

водной среде водорастворимые силикаты калия и натрия с увеличением объема, что вызывает растрескивание бетона. Содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в цементах при условии их применения в таких бетонах ограничивается до 0,6 %.

**Теория твердения портландцемента.** Превращение цементного теста в камневидное тело обусловлено сложными химическими и физико-химическими процессами взаимодействия клинкерных минералов с водой, в результате которых образуются новые гидратные соединения, практически не растворимые в воде. Процесс гидролиза и гидратации трехкальцевого силиката выражается уравнением

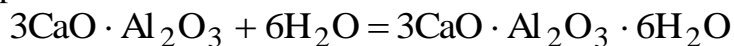


В результате образуется практически нерастворимый в воде гидросиликат кальция и гидроксид кальция, который частично растворим в воде.

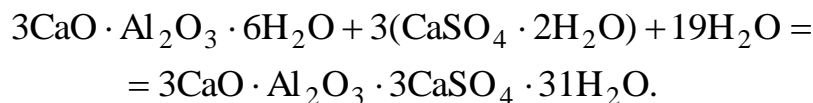
Двухкальцевый силикат гидратируется медленнее  $\text{C}_2\text{S}$ , и при его взаимодействии с водой выделяется меньше  $\text{Ca(OH)}_2$ , что видно из уравнения реакции



Взаимодействие трехкальцевого алюмината с водой приводит к образованию гидроалюмината кальция:

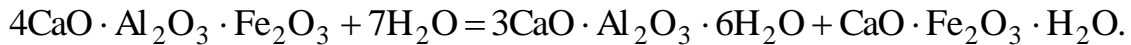


Эта реакция протекает с большой скоростью. Образующийся шестиводный трехкальцевый алюминат создает непрочную рыхлую кристаллизационную структуру и вызывает быстрое загустевание цементного теста. Замедление сроков схватывания ПЦ достигается введением при помоле небольшой добавки двуводного гипса. В результате химического взаимодействия трехкальцевого гидроалюмината с введенным гипсом и водой образуется труднорастворимый гидросульфалюминат кальция (эттрингит) по схеме:



В насыщенном растворе  $\text{Ca(OH)}_2$  эттрингит сначала выделяется в коллоидном тонкодисперсном состоянии, осаждаясь на поверхности цементных частиц, образуя тонкую плотную экранирующую оболочку, что замедляет их гидратацию и отодвигает схватывание цемента. При правильной дозировке гипса он является не только регулятором сроков схватывания ПЦ, но и улучшает свойства цементного камня. Это связано с тем, что кристаллизация  $\text{Ca(OH)}_2$  из пересыщенного раствора понижает концентрацию гидроксида кальция в растворе, и эттрингит через 6-8 ч перекристаллизовывается в виде длинных иглоподобных кристаллов, которые создают начальную волокнистую структуру твердеющего цементного камня.

Четырехкальциевый алюмоферрит при действии воды гидролитически расщепляется с образованием шестиводного трехкальциевого алюмината и гидроферрита кальция по схеме



Однокальциевый гидроферрит, взаимодействуя с гидроксидом кальция, который ранее образовался при гидролизе  $\text{C}_3\text{S}$ , переходит в более высокоосновный гидроферрит кальция  $4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ . Гидроалюминат связывается добавкой гипса, а гидроферрит входит в состав цементного геля.

Как указано выше, механизм твердения минеральных вяжущих, в том числе и портландцемента, описывают теориями Ле-Шателье, Михаэлиса и Байкова. *Кристаллизационная* теория Ле-Шателье была показана выше на примере твердения гипсовых вяжущих. *Коллоидная* теория Михаэлиса заключается в том, что вяжущее гидратируется не через раствор, как в теории Ле-Шателье, а непосредственным присоединением воды к твердой фазе в результате топохимических реакций. При этом происходит самодиспергирование твердой фазы, а гидраты в виде гелевидных частичек выпадают на поверхности исходных зерен, образуя гелевые пленки. По мере развития процесса гидраты накапливаются в пределах контура исходных зерен, происходит уплотнение геля и твердение системы.

В настоящее время процесс твердения цемента наиболее часто описывают теорией русского ученого *А.А. Байкова*. Эта теория в известной мере обобщает теории Ле-Шателье и Михаэлиса, и, согласно ей, процесс твердения можно разделить на три периода. *На первом периоде* гидратация идет через раствор (по Ле-Шателье), однако этот процесс протекает медленно и существенной роли по крайней мере в ранние сроки твердения не играет. *На втором периоде* происходит непосредственное присоединение воды к твердой фазе путем топохимических реакций, и накопление гелевой массы гидратных новообразований приводит к схватыванию системы. *Третий период* соответствует образованию кристаллического «сростка» в основном за счет перекристаллизации гелевых частиц и их срастания, а также присоединения к ним кристаллов, образовавшихся на первом периоде, что в конечном итоге приводит к твердению системы. Следует подчеркнуть, что, согласно А.А. Байкову, все три периода идут параллельно во времени.

С современной точки зрения процессы твердения портландцемента приводят к появлению и развитию во времени слоя новообразований, состоящих из «внешнего», образующегося через раствор, и «внутреннего» (в результате топохимических реакций) гидратов, отличающихся по структуре и морфологии. Для тех и других гидратов характерна приуроченность к поверхности цементных зерен (в частности зерен  $\text{C}_3\text{S}$ ), так как для «внутренних» гидратов служат подложкой активные участки поверхности, а приуроченность «внешних» гидратов обусловлена более высокой концен-



трацией и пересыщением жидкой фазы минералообразующими ионами именно вблизи поверхности исходных зерен. Следствием указанных причин является то, что центральная зона межзернового пространства может быть свободна или частично заполнена «сростками» кристаллических частиц «внешних» гидратов, что создает ослабленные участки в формирующейся структуре. Преодолеть эту неоднородность структуры цементного камня и улучшить его качество помогают оптимальные количества химических добавок и наполнителей.

**Структура цементного камня.** Выделяют основные элементы структуры цементного камня:

1. *Непрореагировавшие зерна* клинкера, количество которых постепенно уменьшается.

2. Относительно *крупные кристаллы*  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и этtringита (ГСАК), образующие каркас цементного камня, который увеличивает его упругие свойства, жесткость.

3. Мелкие *гелевидные частички* гидросиликатов кальция – цементный клей, который играет роль матрицы, придает цементному камню связанность и деформативные свойства.

Соотношение кристаллической и гелевой составляющих определяет индивидуальные физико-механические свойства цементного камня: прочность, деформативность и т.д. При этом указанное соотношение зависит от химического и минерального состава цемента.

4. Очень мелкие *гелевые поры* (в которых вода замерзает только при  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  и ниже и не перемещается под действием силы тяжести). Эти поры большого влияния на свойства цемента не оказывают.

5. *Капиллярные поры* (размером 0,1-20 мкм), которые получаются за счет испарения излишней воды затворения, не вступившей в химические реакции. Они не желательны, так как в них вода замерзает уже ниже  $-5\text{ }^\circ\text{C}$ , что опасно с точки зрения морозостойкости. С другой стороны, вода поглощается в эти поры даже из воздуха за счет капиллярной конденсации. Количество этих пор необходимо уменьшать за счет снижения начального количества воды затворения.

6. *Крупные воздушные поры* (от 50-100 мкм до 2 мм), которые появляются за счет вовлечения воздуха в бетонную и растворную смесь при перемешивании. Они, как правило, замкнутые и имеют положительное значение, так как, в отличие от капиллярных пор, обычно не заполняются водой и в большей степени снижают теплопроводность материала и, кроме того, не только не снижают, а даже увеличивают его морозостойкость (играют роль резервных пор).

В порах цементного камня обычно присутствует *жидкая фаза*, которая представляет собой водные растворы щелочей, прежде всего  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Это обуславливает отсутствие коррозии стальной арматуры в цементном

бетоне при достаточной концентрации раствора  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  вследствие «пассивирующего» действия щелочи по отношению к стали.

**Свойства портландцемента.** *Истинная плотность* портландцемента 3,1-3,15 г/см<sup>3</sup>; *насыпная плотность* 900-1100 кг/м<sup>3</sup>.

*Водопотребность* цемента при получении теста нормальной густоты обычно 24-28 %. Снижение водопотребности достигается использованием добавок пластификаторов (ПАВ) и особенно суперпластификаторов.

*Сроки схватывания* портландцемента определяются тоже на приборе Вика (с иглой). По ГОСТ начало схватывания ПЦ должно быть не ранее 45 минут и не позднее 10 часов. Для ускорения или замедления схватывания применяют химические добавки. *Ускорителями* являются: хлориды, сульфаты и карбонаты щелочных металлов ( $\text{CaCl}_2$ , поташ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  и т.п.), жидкое стекло, формиат кальция. Необходимо учитывать, что некоторые из них (особенно хлориды) вызывают коррозию арматуры в железобетоне. *Замедлители*: лигносульфонаты кальция (ЛСТ), сахарная патока.

*Равномерность изменения объема* цемента при твердении является важным качественным показателем. Причиной неравномерного изменения объема цементного камня являются местные деформации, вызываемые расширением свободного  $\text{CaO}$  и периклаза  $\text{MgO}$  вследствие их запоздалой гидратации (гашения). По стандарту изготовленные из теста нормальной густоты образцы-лепешки через 24 ч предварительного твердения выдерживают в течение 3 ч в кипящей воде. Лепешки не должны деформироваться, не допускаются также радиальные трещины, доходящие до краев.

*Тепловыделение* цемента обусловлено тем, что реакции гидратации клинкерных минералов являются экзотермическими. Наиболее интенсивно ПЦ выделяет тепло в ранние сроки твердения, причем большее содержание алита и трехкальцевого алюмината обуславливает большее тепловыделение. Белитовые цементы имеют меньшее тепловыделение. Бóльшее тепловыделение позволяет твердеть бетону при низких температурах, в том числе при отрицательных (метод «термоса»), мёньшее – нужно для массивных конструкций (для недопущения неравномерных температурных деформаций).

**Прочность портландцемента.** Прочность ПЦ, а также шлакопортландцемента и их разновидностей характеризуют марками, которые определяют по пределу прочности на сжатие и изгиб образцов-балочек, изготовленных из цементно-песчаного раствора состава 1:3 нормальной консистенции, после твердения образцов в течение 28 суток при нормальных условиях. Цементы разделяют на марки: 300 (цемент пониженной прочности), 400 (рядовой), 500 (повышенной прочности), 550 и 600 (высокопрочные). Марки ПЦ: 400, 500, 550 и 600.

Предел прочности на сжатие (в МПа) половинок образцов-балочек в возрасте 28 суток называется *активностью* цемента.

Прочностные показатели портландцемента, а также шлакопортландцемента и их разновидностей приведены в табл. 2.

Таблица 2. Прочностные показатели портландцемента, шлакопортландцемента и их разновидностей

Наименование цемента	Марка цемента	Предел прочности, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )			
		при изгибе в возрасте, сут		при сжатии в возрасте, сут	
		3	28	3	28
Портландцемент, портландцемент с минеральными добавками, шлакопортландцемент	300	-	4,4 (45)	-	29,4 (300)
	400	-	5,4 (55)	-	39,2 (400)
	500	-	5,9 (60)	-	49,0 (500)
	550	-	6,1 (62)	-	53,9 (550)
	600	-	6,4 (65)	-	58,8 (600)
Быстротвердеющий портландцемент	400	3,9 (40)	5,4 (55)	24,5 (250)	39,2 (400)
	500	4,4 (45)	5,9 (60)	27,5 (280)	49,0 (500)
Быстротвердеющий шлакопортландцемент	400	3,4 (35)	5,4 (55)	19,6 (200)	39,2 (400)

Прочность портландцемента зависит: а) от минерального состава клинкера; б) тонкости помола; в) водоцементного отношения; г) времени и условий твердения; д) времени и условий хранения. Влияние *минерального состава клинкера* на твердение ПЦ иллюстрирует рис.4, на котором показана кинетика набора прочности отдельных минералов.

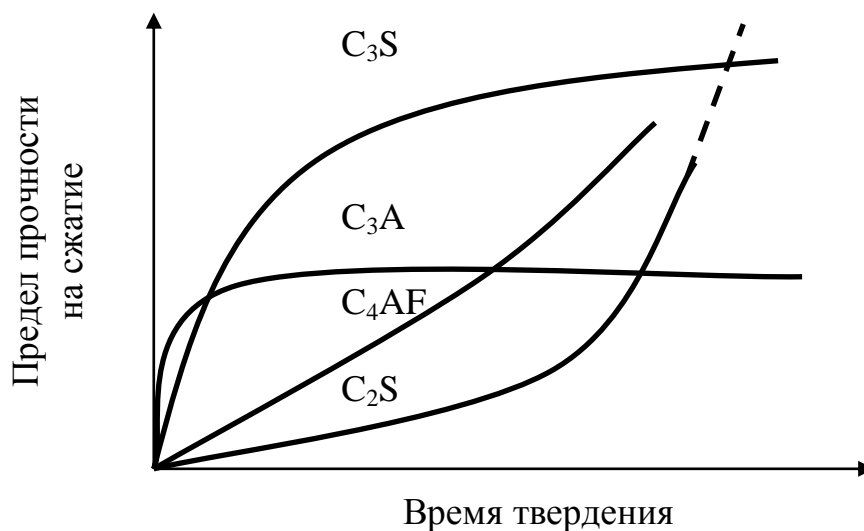


Рис.4. Кинетика набора прочности отдельных минералов клинкера

Алит твердеет быстро и набирает высокую прочность. Белит твердеет резко замедленно, но при благоприятных условиях твердения в поздние

сроки его прочность может превысить прочность алита. Трехкальциевый алюминат отличается очень высокой скоростью гидратации, но его конечная прочность вследствие рыхлой структуры невысока. Четырехкальциевый алюмоферрит по кинетике набора прочности занимает промежуточное положение между алитом и белитом. Кинетика твердения и конечная прочность ПЦ в целом будут определяться соответственно указанному влиянию отдельных минералов и их содержанию в клинкере.

*Тонкость помола* оказывает существенное влияние на прочность цемента, так как чем тонкость помола выше, тем выше его скорость твердения.

Влияние *водоцементного отношения* показано на рис.5. Максимальная прочность цементного камня достигается при оптимальном для данного цемента значении В/Ц (обычно 25 – 27 %), соответствующем наилучшей структуре материала. Снижение прочности при меньших значениях В/Ц объясняется недостатком порового пространства для размещения новообразований и, как следствие, появлением внутренних напряжений. Уменьшение прочности цементного камня при увеличении В/Ц сверх оптимального объясняется увеличением объема пор, прежде всего капиллярных, появляющихся за счет наличия и последующего испарения излишней воды затворения, не вступившей в химические реакции.

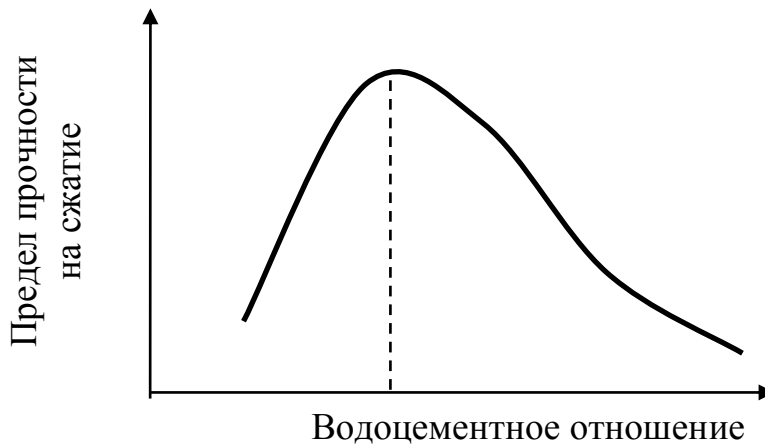


Рис.5. Влияние водоцементного отношения на прочность цемента

Со *временем* при твердении цемента в нормальных условиях его прочность значительно вырастает (через 1-2 года может на 30-40 % превысить марочную 28-суточную прочность).

*Условия твердения* оказывают сильное влияние на прочность цемента. Наиболее быстрое его твердение происходит при повышенной (до 70-80 °С) температуре и относительной влажности среды, близкой к 100 %. Наоборот, высыхание цементного камня, а также его замораживание прекращают твердение, а последнем случае может произойти даже сброс прочности. Особенно отрицательное действие оказывает раннее замораживание (когда цемент еще не набрал достаточной прочности), которое мо-

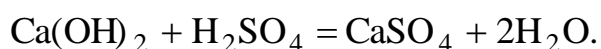
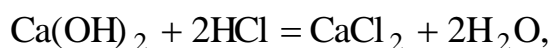
жет вызвать разрушение изделий. При низких положительных температурах твердение идет, но медленно.

*Хранение* цемента, даже при отсутствии прямого доступа влаги, снижает его способность к эффективному твердению. Через 1-3 месяца хранения активность цемента падает на 10-20 %, через 3-6 месяцев – на 30-40 %.

**Морозостойкость** – важнейшее свойство цементного камня. Оно зависит прежде всего от его капиллярной пористости. Морозостойкость повышается за счет ограничения водоцементного отношения, что возможно при условии применения пластифицирующих химических добавок. Кроме того, морозостойкость повышают введением воздухововлекающих добавок (микропенообразователей).

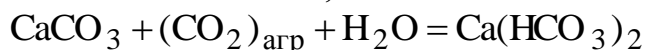
**Стойкость портландцемента к химической коррозии.** Выделяют коррозию *первого вида* – разрушение цементного камня в результате растворения и вымывания некоторых его составных частей (в основном *коррозия выщелачивания*). Главным средством борьбы с выщелачиванием гидроксида кальция является применение плотного бетона и введение в цемент активных минеральных добавок, связывающих  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в малорастворимое соединение – гидросиликат кальция.

Коррозия *второго вида* происходит при действии на цементный камень агрессивных веществ, которые, вступая во взаимодействие с составными частями цементного камня, образуют либо легкорастворимые и вымываемые водой соли, либо аморфные массы, не обладающие связующими свойствами (кислотная и магнезиальная коррозия, коррозия под влиянием некоторых органических веществ и т.п.). *Кислотная* коррозия возникает под действием растворов любых кислот, за исключением поликремниевой и кремнефтористо-водородной. Кислота вступает в химическое взаимодействие с гидроксидом кальция, образуя растворимые соли (например,  $\text{CaCl}_2$ ) или соли, увеличивающиеся в объеме ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ):

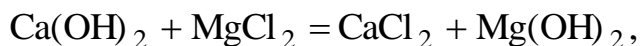


От слабой кислотной коррозии ( $\text{pH} = 4 \dots 6$ ) бетоны защищают кислотостойкими материалами (окраской, пленочной изоляцией и т.п.).

*Углекислотная* коррозия является разновидностью кислотной коррозии. Она развивается при действии на цементный камень воды, содержащей свободный диоксид углерода (агрессивный) в виде слабой угольной кислоты сверх равновесного количества,



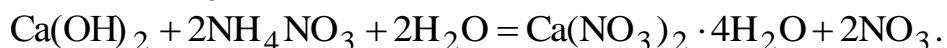
*Магнезиальная* коррозия наступает при воздействии на гидроксид кальция растворов магнезиальных солей:



Меры защиты от этой коррозии те же, что и от коррозии 1-го вида.

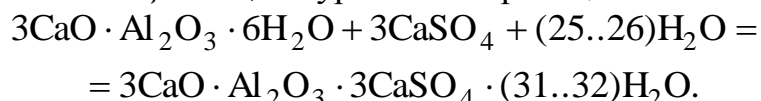
Коррозия под действием *органических кислот*, как и неорганических, быстро разрушает цементный камень. Вредное влияние оказывают *масла, нефть, керосин, бензин, мазут* и т.д.

Коррозия цементного камня возникает также под действием *минеральных удобрений*, особенно аммиачных. Аммиачная селитра, состоящая в основном из  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , действует на гидроксид кальция:



Образуется нитрат кальция, который хорошо растворяется в воде и вымывается из бетона.

Коррозия *третьего вида* объединяет процессы, при которых компоненты цементного камня, вступая во взаимодействие с агрессивной средой, образуют соединения, занимающие больший объем, чем исходные продукты реакции. Характерной коррозией этого вида является *сульфатная* коррозия. Ее разновидность – *сульфоалюминатная* коррозия – возникает вследствие взаимодействия гипса с гидроалюминатом цементного камня с образованием гидросульфалюмината кальция трехсульфатной формы, называемого *цементной бациллой*, по уравнению реакции



Для предотвращения сульфатной коррозии используют сульфатостойкий ПЦ. При сульфатной агрессии целесообразно также применять пуццолановые и шлаковые портландцементы, но тогда, когда бетоны не будут подвергаться частым попеременным замерзаниям и оттаиваниям.

Коррозия под действием *концентрированных растворов щелочей*, особенно при последующем высыхании, возникает в результате образования соединений, кристаллизующихся с увеличением в объеме (сода или поташа – при насыщении бетона едким натром или кали). В слабощелочной среде цементный камень не подвергается коррозии.

Защита бетона и других материалов от коррозии требует больших расходов. Поэтому при строительстве зданий необходимо определить характер возможного действия среды на бетон, а затем разработать и осуществить нужные меры для предотвращения коррозии, которые в общем случае сводятся к трем основным путям:

- ✓ правильный выбор цемента;
- ✓ изготовление плотных и водонепроницаемых бетонов;
- ✓ применение защитных покрытий.

## 5.6. Разновидности портландцемента

Разновидности ПЦ получают за счет частичного изменения минерального состава клинкера, введения активных минеральных добавок до 20 %, а также небольшого количества органических добавок (ПАВ). Эти меры

позволяют изготовить более эффективный цемент для той или иной области строительства, защиты сооружений от определенных видов коррозии.

**Быстротвердеющие портландцементы (БТЦ)** марок ПЦ400(500)-Б отличаются повышенной скоростью твердения (через 3 суток набирают 40-50 % марочной прочности). Скорость твердения обеспечивается большим содержанием  $C_3S$  (алита) и  $C_3A$ , чем у обычного цемента (суммарное содержание этих минералов обычно не менее 60-65 %), а также более тонким помолом. Быстротвердеющие портландцементы применяют в производстве сборных бетонных и железобетонных конструкций (позволяют сократить или полностью отказаться от тепловой обработки бетона), а также при зимних бетонных работах.

**Высокопрочные портландцементы (ВПЦ)** марок 550 и 600 одновременно являются быстротвердеющими, так как их прочность во все сроки твердения выше, чем у рядового ПЦ. Эти цементы получают за счет применения однородного сырья, увеличенного содержания в клинкере  $C_3S$  (до 65-68 %) при ограничении  $C_3A$  (не более 8 %), повышенной тонкости помола. Высокопрочные портландцементы используются для возведения ответственных сооружений. Следует иметь в виду повышенное тепловыделение БТЦ и ВПЦ, которое исключает их применение для массивных конструкций.

**Сульфатостойкий портландцемент (ССПЦ)** отличается повышенной стойкостью к сульфатной коррозии. Этот цемент получают на основе клинкера нормированного минерального состава, содержащего не более 50 %  $C_3S$ , 5 %  $C_3A$  и 22 % ( $C_3A + C_4AF$ ). СППЦ медленно твердеет и имеет марки по прочности 300 и 400. Ускоренного твердения добиваются тепловой обработкой. СППЦ применяется для строительства гидротехнических сооружений (зоны переменного уровня воды, где необходима одновременно высокая сульфатостойкость и морозостойкость), а также для изготовления коррозионностойких массивных конструкций (из-за малого тепловыделения).

**Портландцементы с органическими добавками.** *Пластифицированный* ПЦ-ПЛ и *гидрофобный* ПЦ-ГФ получают введением в ПЦ при помоле водных растворов соответственно пластифицирующих (0,15-0,25 % ЛСТ) или гидрофобизирующих (0,05-0,15 % мылонафта, асидола и др.) добавок. Эти цементы требуют меньшее количество воды затворения, что повышает плотность и морозостойкость цементного камня. При одинаковом с обычным цементом содержании воды затворения увеличивается пластичность сырьевой смеси (ПЦ-ПЛ дает больший эффект в жирных смесях, ПЦ-ГФ – в тощих). Кроме того, применение ПЦ-ГФ позволяет получить дополнительный эффект – водоотталкивающие свойства у готовых изделий, а сам цемент лучше хранится.

К современной разновидности портландцементов с органическими добавками следует отнести *вяжущее (цемент) низкой водопотребности*

(ВНВ или ЦНВ), которое получают помолом портландцементного клинкера совместно с добавками гипса, сухого суперпластификатора и минеральными добавками, или домолом заводского цемента совместно с суперпластификатором (и минеральными добавками). При помоле цемента в присутствии суперпластификатора, обычно С-3 в количестве до 3 %, происходит микрокапсулирование цементных частиц тончайшими оболочками из суперпластификатора. При этом достигаются чрезвычайно низкая водопотребность (15-18 %), быстрый набор прочности в ранние сроки (через сутки 25-30 МПа), высокая конечная прочность (до 80-100 МПа). Марки ВНВ характеризуют содержание клинкера (остальное – минеральные добавки): ВНВ-100 (100 % клинкера), ВНВ-80 (80 % клинкера), ВНВ-50 (50 % клинкера), ВНВ-30 (30 % клинкера). С увеличением содержания минеральных добавок прочность ВНВ снижается, оставаясь тем не менее достаточно высокой (для ВНВ-30 – на уровне рядового портландцемента), что объясняется механохимической активацией составляющих ВНВ в процессе их совместного сухого помола совместно с суперпластификатором. Использование ВНВ позволяет существенно сократить сроки строительства при возведении монолитных сооружений, изготавливать железобетонные конструкции в заводских условиях без использования термообработки.

**Дорожный портландцемент** получают на основе клинкера нормированного минерального состава (ПЦ-Н). Минеральный состав клинкера характеризуется ограниченным содержанием  $C_3A$  (до 8 %) и меньшим содержанием  $C_3S$ . В цемент вводят добавки ПАВ и прежде всего пластифицирующие и воздухововлекающие добавки. Дорожный ПЦ отличается замедленным схватыванием (начало схватывания не ранее 1,5 часа), высокой морозо- и химической стойкостью, повышенной прочностью на изгиб.

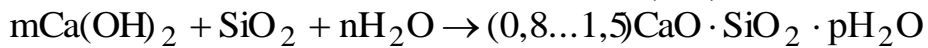
**Белый и цветные портландцементы** (декоративные) изготавливают на основе белого клинкера, который почти не содержит оксидов железа и марганца, придающих обычному цементу зеленовато-серый цвет. При помоле клинкера в качестве добавки используют белый диатомит и предохраняют цемент от попадания в него частиц железа. Этот цемент выпускают марок 400 и 500. Цветные портландцементы получают, примешивая к белому цементу щелочестойкие пигменты (оксид хрома, железный сурик, охра и др.). Белый и цветные портландцементы применяются для придания растворов и бетонам декоративных свойств.

### **5.7. Многокомпонентные цементы с минеральными добавками и шлаковые цементы**

**Активными минеральными (гидравлическими) добавками** называют природные или искусственные вещества, которые при смешивании в тонкоизмельченном состоянии с воздушной известью и водой образуют медленноотвердевающие гидравлические вяжущие. Активные минеральные добавки могут быть природными и искусственными.



К *природным (пуццолановым)* относят некоторые осадочные горные породы (диатомит, трепел, опока), а также породы вулканического происхождения (пепел, туф, пемза). Пуццолановые добавки содержат кремнезем – диоксид кремния в аморфном, а следовательно, в химически активном состоянии и способны поэтому взаимодействовать в нормальных условиях с растворимым гидроксидом кальция, образуя практически нерастворимые гидросиликаты кальция (ГСК), что значительно повышает стойкость цементного камня в отношении выщелачивания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ :



В качестве *искусственных* минеральных добавок используют побочные продукты и отходы промышленности: быстроохлажденные (гранулированные) доменные и электротермофосфорные шлаки, топливные золы (уноса). Весьма перспективной техногенной добавкой является отход производства ферросилиция – аморфный *микрокремнезем* (МК), обладающий очень высокой пуццоланической активностью. Кроме того, эффективность действия МК связана с его чрезвычайно высокой дисперсностью. При заполнении пространства между цементными частицами ультрадисперсными частицами МК образуются многочисленные коагуляционные контакты, являющиеся дополнительными центрами образования гидросиликатов кальция. Более прочные и устойчивые низкоосновные ГСК кольяматируют поры, повышают однородность структуры цементного камня и улучшают его качественные показатели, достигающие высокого уровня, в том числе при использовании рядовых цементов средних марок и обычной технологии их применения.

Наиболее известными и широко применяемыми среди многокомпонентных цементов с минеральными добавками и шлаковых цементов являются пуццолановый портландцемент и шлакопортландцемент.

**Пуццолановый портландцемент (ППЦ)** изготавливают путем совместного помола клинкера, содержащего не более 8 %  $\text{C}_3\text{A}$ , и пуццолановой добавки в количестве 20-40 % с необходимым количеством гипса. ППЦ относится к группе сульфатостойких цементов и выпускается марок М300 и М400. Этот цемент следует применять для бетонов, постоянно находящихся во влажных условиях (подводные и подземные части сооружений). На воздухе ППЦ дает большую усадку и теряет прочность. Бетон на ППЦ твердеет медленно и имеет низкую морозостойкость. Вследствие малого тепловыделения ППЦ часто применяется для внутренних частей массивных конструкций.

**Шлакопортландцемент (ШПЦ)** изготовляют так же как и ППЦ, но в качестве активной добавки используют доменные гранулированные (или электротермофосфорные) шлаки, содержание которых должно быть не менее 21 % и не более 80 % от массы цемента. *Доменные шлаки* – продукт сплавления веществ, находящихся в пустой породе руды и флюса (известняка). По химическому составу шлаки состоят из  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и отчас-

ти  $MgO$ . Суммарное содержание этих оксидов составляет 90 – 95 %. Грануляция шлаков заключается в быстром охлаждении шлакового расплава водой или паром. При этом расплав распадается на отдельные гранулы, приобретающие стекловидное и тонкозернистое химически активное состояние. Гранулированный шлак к самостоятельному твердению не способен; он взаимодействует с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидратации клинкерных минералов, и с добавкой гипса с образованием гидросиликатов, гидроалюминатов и гидросульфоалюминатов кальция. Этот цемент выпускают марок 300, 400 и 500. Он отличается замедленным твердением, особенно в ранние сроки. Процесс твердения ШПЦ значительно ускоряется при тепловлажностной обработке, поэтому его эффективно применять для сборных бетонных и железобетонных изделий.

**Тонкомолотые цементы (ТМЦ)** получают совместным тонким помолом портландцементного клинкера или готового портландцемента, активной минеральной добавки (зола-унос, пуццоланы, шлак и т.д.), гипсового камня (гипс). От ВНВ или ЦНВ тонкомолотые цементы отличаются отсутствием суперпластификатора. Механохимическая обработка (тонкий помол) при получении ТМЦ позволяет синергетически усилить полезные свойства компонентов комплексного вяжущего: активность клинкерной части увеличивается в 1,5-2 раза, а частицы наполнителя играют роль уплотняющего компонента на микроуровне и являются структурообразующими центрами для новообразований цементного камня. Использование этих принципов позволяет ТМЦ при содержании до 70 % минеральных добавок (ТМЦ-80, ТМЦ-50, ТМЦ-30) по качеству не уступать портландцементам марок 400-500, а иногда и превосходить их. При замене гипса в ТМЦ на химические регуляторы схватывания и твердения, а также с применением специальных добавок, понижающих точку замерзания воды в бетоне, получена широкая гамма вяжущих для ведения бетонных работ при отрицательных температурах.

Принципы технологии ТМЦ использованы при получении новых гипсовых, гипсоцементно-пуццолановых и пробужденных безклинкерных вяжущих, бетоны на которых характеризуются повышенными по сравнению с традиционными материалами прочностью и стойкостью при воздействии внешних факторов, а также значительно меньшей энергоемкостью.

### **5.8. Цементы на основе клинкеров специального состава**

Наиболее радикального изменения свойств цементов в нужную сторону добиваются путем получения клинкеров на основе другой, нежели у портландцемента, системы оксидов. К таким цементам в частности относятся такие важные вяжущие, как алюминатные (глиноземистый), расширяющиеся и напрягающий цементы.

**Глиноземистый цемент (ГЦ)** – быстротвердеющее и высокопрочное гидравлическое вяжущее, получаемое обжигом до спекания или плавления

сырьевой смеси известняка или извести и бокситов, содержащих глинозем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , с последующим тонким помолом продукта обжига. В клинкере ГЦ преимущественно содержится однокальциевый алюминат  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ . Этот минерал очень быстро гидратируется, что определяет быстрое твердение цемента. ГЦ за сутки набирает 60-70 % марочной прочности, причем марки этого цемента, определяемые в возрасте 3-х суток, – М500 и М600. ГЦ отличается высокой химической стойкостью и жаростойкостью. Его недостатком является высокая чувствительность к повышенным температурам (свыше 25 °С) при твердении, в результате чего может произойти разрушение изделий. С учетом специфических свойств и высокой стоимости ГЦ применяется при аварийно-спасательных работах, особенно в холодных условиях (на Севере), а также для получения огнеупорных и химически стойких бетонов. Кроме того, глиноземистый цемент используется для получения расширяющихся цементов.

**Расширяющиеся и напрягающие цементы** обладают рядом ценных свойств: большой скоростью твердения, способностью расширяться при твердении, что позволяет избежать усадочных деформаций, растрескивания цементного камня и получить водонепроницаемые бетоны.

**Водонепроницаемый расширяющийся цемент (ВРЦ)** является быстротвердеющим и быстротвердеющим гидравлическим вяжущим. Он получается путем тщательного смешивания глиноземистого цемента (70 %), гипса (20 %) и молотого специально изготовленного гидроалюмината кальция (10 %).

**Гипсоглиноземистый расширяющийся цемент (ГГРЦ)** – быстротвердеющее гидравлическое вяжущее, получаемое совместным тонким помолом глиноземистого клинкера или шлака (70 %) и природного двуводного гипса (30 %). ГГРЦ обладает свойством расширения при твердении в воде; при твердении на воздухе он проявляет безусадочные свойства.

**Расширяющийся портландцемент (РПЦ)** – гидравлическое вяжущее, получаемое совместным тонким помолом портландцементного клинкера (58 – 63 %), глиноземистого клинкера или шлака (5 – 7 %), гипса (7 – 10 %) и доменного гранулированного шлака или другой активной минеральной добавки (23 – 28 %). РПЦ отличается быстрым твердением, высокой плотностью и водонепроницаемостью цементного камня при условии регулярного увлажнения в течение первых трех суток.

**Напрягающий цемент (НЦ)** отличается от РЦ большей химической энергией расширения, достаточной для самонапряжения арматуры. Этот цемент состоит из 65 – 75 % портландцемента, 13 – 20 % глиноземистого цемента и 6 – 10 % гипса. Затворенный водой НЦ сначала твердеет, затем после набора прочности около 15 МПа расширяется как твердое тело и напрягает стальную арматуру. Изделия на НЦ должны твердеть в стыках или швах конструктивных элементов зданий и сооружений либо при достаточном пространственном армировании конструкций. Эти цементы имеют

марки НЦ-20, НЦ-40 и НЦ-60 (цифра в обозначении марки указывает энергию расширения в десятых долях МПа). Цемент марки НЦ-20 проявляет безусадочные свойства и применяется для изготовления бетонов с компенсированной усадкой. Цементы НЦ-40 и НЦ-60 обеспечивают получение водонепроницаемых бетонов и самонапряженных железобетонных изделий и конструкций: напорных труб, монолитных и сборных резервуаров для воды, плавательных бассейнов, подземных сооружений.

## 6. БЕТОНЫ

### 6.1. Общие сведения

*Бетон – искусственный каменный материал, получаемый путем затвердевания рационально подобранной смеси минерального или органического вяжущего вещества, заполнителей, воды и добавок.* Это один из самых массовых строительных материалов, обладающий комплексом ценных свойств, способностью приобретать любые формы в зданиях и сооружениях, сравнительно низкой стоимостью.

**Классификация бетонов.** Бетоны классифицируют по средней плотности, виду вяжущего вещества и назначению.

По *плотности* различают особо тяжелые бетоны с плотностью более 2500 кг/м<sup>3</sup>; тяжелые – 1800...2500 кг/м<sup>3</sup>; легкие – 500...1800 кг/м<sup>3</sup>; особо легкие – менее 500 кг/м<sup>3</sup>. Особо тяжелые бетоны получают на основе заполнителя из железной руды, барита, чугунного скрапа, свинцовой дроби; тяжелые – на основе заполнителя из плотных горных пород: гранитов, диабазы, песчаника и др. В легких бетонах используют природный или искусственный пористые заполнители, в том числе пемзу, керамзит, аглопорит и др. Особо легкие бетоны (теплоизоляционные) отличаются тем, что своеобразным заполнителем в них являются воздушные или газовые поры-ячейки.

По *виду вяжущего* бетоны делят на цементные (цементобетоны), гипсовые (гипсобетоны), силикатные, полимербетоны, асфальтобетоны и т.д.

По *назначению* бетоны бывают: общего назначения (для несущих и ограждающих конструкций); специального назначения (для защиты от радиации, для дорожных и аэродромных покрытий, жароупорные, кислотостойкие, гидроизоляционные, декоративные и др.).

### 6.2. Материалы для изготовления бетонов

**Вяжущее вещество.** Для изготовления обычного бетона наиболее широко применяют минеральные вяжущие вещества, прежде всего портландцемент и его разновидности. Цемент и вода являются активными составляющими бетона; в результате реакции между ними образуется цементный камень, скрепляющий зерна заполнителей в единый монолит.

**Заполнители** часто называют инертными материалами. Однако они существенно влияют на структуру и свойства бетона. Заполнители создают жесткий каркас и поэтому значительно уменьшают деформации бетона при твердении и под нагрузкой. В качестве заполнителей преимущественно используют местные горные породы и вторичные ресурсы (шлаки и др.). Применение этих дешевых заполнителей снижает стоимость бетона, так как на их долю обычно приходится до 80 % объема бетона. Легкие пористые заполнители снижают плотность бетона и улучшают его теплотехнические свойства.

В бетоне применяют мелкий и крупный заполнители. *Мелким* заполнителем (менее 5 мм) для тяжелого бетона является природный или искусственный песок. Наиболее часто используемый в качестве мелкого заполнителя *природный* песок представляет собой рыхлую смесь зерен, образовавшуюся в результате выветривания горных пород. При отсутствии природного песка применяют песок, получаемый путем дробления твердых горных пород. Экономически целесообразно в качестве мелкого заполнителя использовать соответствующие по крупности отходы обработки природных каменных материалов.

*Крупный* заполнитель (обычно 5 – 70 мм, иногда до 150 мм) для тяжелого бетона подразделяют на гравий и щебень. *Гравием* называют рыхлый неорганический материал, образовавшийся в результате естественного разрушения (выветривания) горных пород. Гравий состоит из более или менее окатанных зерен. В нем могут содержаться зерна высокой прочности (например, гранитные) и слабые зерна пористых известняков. Обычно он содержит примеси пыли, глины, иногда и органических веществ, а также песка. При большом содержании песка такой материал называют песчано-гравийной смесью или гравелистым песком. *Щебнем* называют крупный заполнитель для бетона, полученный в результате дробления горных пород. Зерна щебня имеют угловатую форму. Желательно, чтобы по форме они приближались к кубу. Более шероховатая, чем у гравия, поверхность зерен способствует лучшему их сцеплению с цементным камнем, поэтому для бетона высокой прочности обычно применяют щебень, а не гравий.

К заполнителям бетона предъявляются различные требования. Наибольшее значение имеют зерновой состав и содержание вредных примесей, а для плотных заполнителей тяжелого бетона – еще и прочность, морозостойкость, содержание естественных радионуклидов и стойкость к различным формам распада.

*Зерновой (гранулометрический) состав* показывает соотношение в заполнителе зерен разной крупности. Оптимальный зерновой состав обеспечивает плотную упаковку зерен заполнителя, что снижает расход цемента и повышает прочность бетона. Различают заполнители с непрерывной и прерывистой гранулометрией. В первом случае в заполнителе встречаются зерна всех размеров в диапазоне от наименьшего до наибольшего. Если же

в заполнителе отсутствуют зерна каких-либо промежуточных фракций, то его гранулометрию называют прерывистой. Обычно прерывистая гранулометрия обеспечивает меньшую пустотность заполнителя, однако в этом случае уменьшается подвижность бетонной смеси вследствие зацементования мелких зерен между крупными, и для получения пластичной бетонной смеси толщина обмазки зерен заполнителя цементным тестом должна быть больше. В результате уменьшается возможность экономии цемента за счет снижения пустотности заполнителя.

Зерновой состав песка определяют просеиванием его через стандартный набор сит с отверстиями в свету 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,14 мм. Процентное отношение массы остатка на сите к массе взятой пробы называется частным остатком  $\alpha_i$  (%) и вычисляется по формуле

$$\alpha_i = \frac{G_i}{G} \cdot 100,$$

где  $G_i$  — остаток на  $i$ -м сите, г;  $G$  — масса пробы песка, г.

Полный остаток на любом сите  $A_i$  (%) равен сумме частных остатков на ситах с большими размерами, включая и данное сито:

$$A_i = \alpha_{2,5} + \dots + \alpha_i.$$

Модуль крупности песка  $M_k$  вычисляют по формуле

$$M_k = \frac{A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,14}}{100},$$

где  $A_{2,5}$ ,  $A_{1,25}$ ,  $A_{0,63}$ ,  $A_{0,315}$ ,  $A_{0,14}$  — полные остатки на соответствующих ситах, %.

Песок в зависимости от значений нормируемых показателей качества (зернового состава, содержания пылевидных и глинистых частиц) подразделяют на два класса: I и II. По крупности песок подразделяют на группы: очень крупный, повышенной крупности, крупный, средний и мелкий; а во II классе выделяют еще очень мелкий, тонкий и очень тонкий. Результаты просеивания песка часто представляют графически в виде ломаной линии (кривой просеивания), наносимой на область допустимых значений на графике зернового состава (рис.6). При этом содержание в песке зерен крупностью свыше 10 и 5 мм, а также менее 0,14 мм, пылевидных и глинистых частиц, а также глины в комках ограничивается. Органические примеси (например, гумусовые) допускаются только в очень незначительном количестве, т.к. они сильно снижают прочность и даже разрушают бетон.

Зерновой состав крупного заполнителя характеризуют наибольшей и наименьшей крупностью его зерен. Наибольшая крупность щебня (гравия) определяется размером отверстия сита, на котором полный остаток не превышает 5 %, наименьшая — размером сита, на котором полный остаток не

менее 95 %. Кривая просеивания щебня (гравия) должна располагаться в пределах заштрихованной площади графика зернового состава, т.е. в области плотных смесей (рис.7).

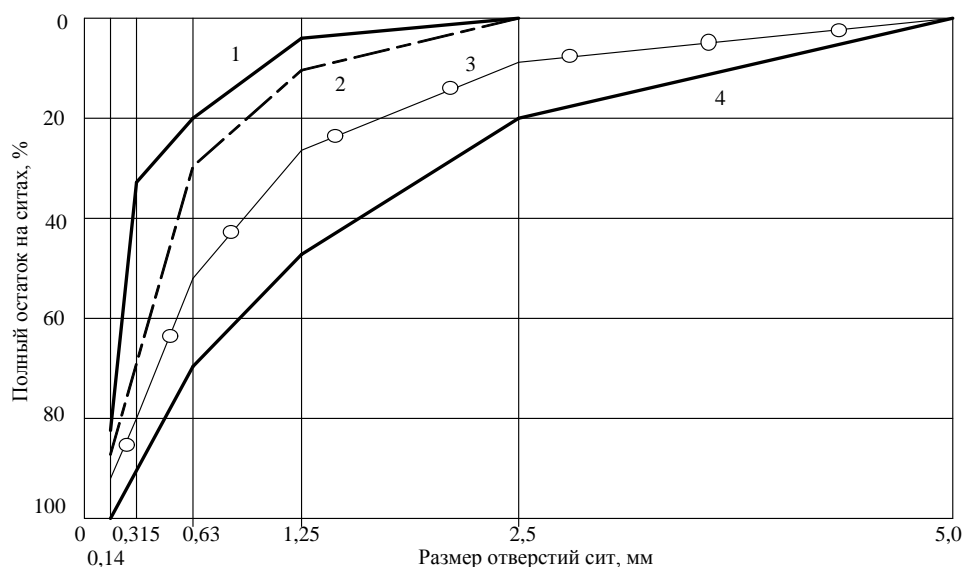


Рис.6. Зерновой состав песка:

1 — нижняя граница крупности песка (модуль крупности 1,5); 2 — нижняя граница крупности песка (модуль крупности 2,0) для бетонов класса В-15 и выше; 3 — нижняя граница крупности песка (модуль крупности 2,5) для бетонов класса В-25 и выше; 4 — верхняя граница крупности песков (модуль крупности 3,25)

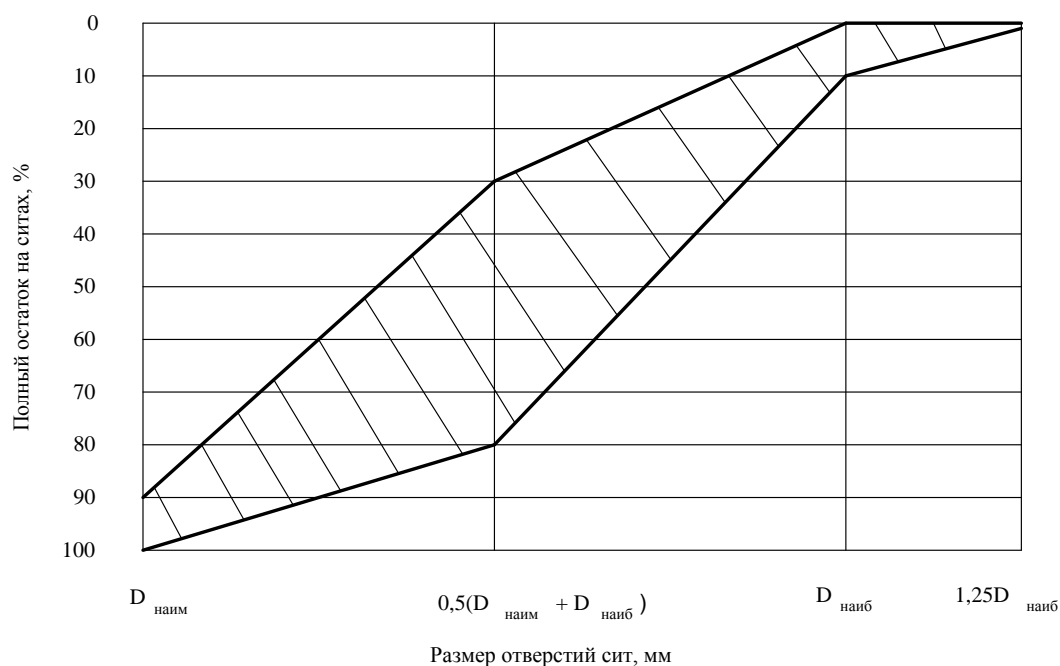


Рис.7. Зерновой состав щебня (гравия)

*Пустотность* крупного заполнителя не должна превышать 45 %. Щебень чище гравия, обычно он не содержит органических примесей. Предельное содержание глинистых и пылевидных примесей по массе в щебне из изверженных пород допускается не более 1 % (для бетонов всех классов); в щебне из карбонатных пород – 2 % (для бетонов класса *B* 22,5 и выше) и 3 % (для бетонов класса *B* 20 и ниже). С целью радиационно-гигиенической оценки заполнителей бетона контролируют для них удельную эффективную активность естественных радионуклидов.

**Добавки** классифицируют по основному эффекту действия: 1) наполнители и микронаполнители, улучшающие структуру бетона на микроуровне, т.е. структуру связующего вещества; 2) регуляторы свойств бетонной смеси – пластификаторы и суперпластификаторы, водоудерживающие добавки; 3) регуляторы сроков схватывания и твердения бетона – ускорители, замедлители, противоморозные добавки; 4) регуляторы структуры – газообразователи, пенообразователи, уплотняющие добавки; 5) ингибиторы коррозии стальной арматуры; 6) придающие бетону специальные свойства – расширяющиеся, гидрофобизирующие, антикоррозионные, электропроводные добавки, пигменты и др. Некоторые добавки обладают полифункциональным действием, например, одновременно пластифицирующим и воздухововлекающим, пластифицирующим и замедляющим эффектами и т.п. Применение разнообразных химических добавок и дисперсных минеральных компонентов в сочетании с соответствующим подбором состава бетона позволяет эффективно управлять его технологией на всех этапах и получать строительные композиты с заданными структурой и свойствами.

### 6.3. Бетонная смесь

Бетонная смесь представляет собой сложную многокомпонентную систему, состоящую из частичек вяжущего и новообразований, которые возникают при взаимодействии вяжущего с водой, зерен заполнителя, воды, вводимых в ряде случаев специальных добавок, а также вовлеченного воздуха. Из-за проявления сил взаимодействия между перечисленными компонентами эта система приобретает связность и может рассматриваться как единое тело с определенными физическими свойствами.

**Структура бетонной смеси.** Взаимодействие между твердыми частицами в бетонной смеси определяется наличием жидкой среды: только при добавлении к сухой смеси цемента и заполнителей воды эта смесь приобретает присущие ей свойства. Силы межчастичного взаимодействия имеют разную физическую природу, и их влияние зависит как от размера частиц, так и от объема жидкой фазы, ее состава, величины поверхностного натяжения. Зерна щебня достаточно велики, удельная поверхность мала, и поэтому их поведение подчиняется в основном гравитационным силам и силам механического зацепления, а действие поверхностных сил практиче-



ски ничтожно. Между частицами песка и особенно дисперсных компонентов (цемента, наполнителя) в полной мере действуют поверхностные силы: капиллярные, молекулярные, атомные. Следует отметить влияние капиллярных сил, действие которых в основном определяет пониженную удобоукладываемость жестких смесей и их повышенную пластическую прочность после уплотнения.

Бетонная смесь содержит частицы различных размеров, и поэтому в ней проявляются все отмеченные выше силы. Характерными и важными процессами структурообразования являются осаждение и прилипание мельчайших частиц вяжущего и наполнителей к поверхности более крупных зерен. Возникновение сил капиллярного сцепления между тонкодисперсными и грубодисперсными частицами в жестких бетонных смесях, значительно превышающих по своей величине другие силы межчастичного взаимодействия, усиливает процесс прилипания частиц вяжущего к зернам заполнителя с образованием агрегатов-глобул, что приводит к формированию более плотных и прочных контактных зон в затвердевшем бетоне.

**Реологические и технологические свойства бетонной смеси.** С точки зрения реологии, бетонная смесь является структурированной системой, обладающей *предельным напряжением сдвига, эффективной (зависящей от приложенных напряжений) вязкостью, периодом релаксации*. В зависимости от состава и прежде всего количества жидкой фазы, смесь приобретает состояние жидкообразной (структурированной жидкости) или твердообразной среды. Под действием внешних напряжений, например в результате вибрации, преодолевается предельное напряжение сдвига, система начинает течь с вязкостью, зависящей от внешних напряжений. После окончания их действия восстанавливается начальная структурная прочность смеси. Это явление получило название *тиксотропии*.

**Технологические свойства.** Для производства работ и обеспечения высокого качества бетона в конструкциях и изделиях необходимо, чтобы бетонная смесь имела консистенцию, соответствующую условиям ее укладки и уплотнения, т.е. определенную *удобоукладываемость*. Это основное технологическое свойство бетонной смеси оценивают показателями *подвижности* (осадкой под действием собственного веса сформованного из бетонной смеси конуса ОК, в сантиметрах) и *жесткости* (временем вибрирования, в секундах, необходимым для требуемого растекания смеси при испытании на стандартном приборе). По этим показателям бетонные смеси подразделяют на группы: сверхжесткие, жесткие смеси (для которых  $ОК = 0$ ), подвижные смеси (которые имеют осадку конуса), а также соответствующие марки.

Помимо удобоукладываемости бетонные смеси характеризуются также *средней плотностью, объемом вовлеченного воздуха, расслаиваемостью, сохраняемостью во времени свойств*: удобоукладываемости, расслаиваемости, объема вовлеченного воздуха.

Свойства бетонной смеси зависят от ее состава, вида и свойств отдельных компонентов. Так, при увеличении содержания цементного теста и, соответственно, уменьшении содержания заполнителей смесь становится более пластичной. Аналогично влияет увеличение содержания в смеси воды, но это может вызвать расслоение смеси, а также падение прочности бетона.

#### 6.4. Структура и свойства тяжелого бетона

**Структура тяжелого бетона.** Структуру бетона изучают на различных уровнях. *Макроструктуру* наблюдают невооруженным глазом или при небольшом увеличении. В качестве структурных элементов здесь выделяют крупный заполнитель, песок, цементный камень, воздушные поры. Иногда удобно принимать макроструктуру, состоящую из двух элементов: крупного заполнителя и растворной части, в которой объединяются цементный камень и песок. *Микроструктуру* наблюдают при большом увеличении под микроскопом. Так изучают структуру цементного камня, которая состоит из непрореагировавших зерен цемента, дисперсных частиц наполнителя, новообразований и микропор различных размеров. Большое значение для свойств бетона имеет различный характер микроструктуры цементного камня в объемном (в порах между зернами заполнителя) и пленочном (на их поверхности) состояниях. В межзерновом пространстве и крупных порах чаще появляются новообразования в кристаллическом виде. В оболочке новообразований вблизи границы с поверхностью заполнителя (контактной зоне), где возможности роста кристаллов ограничены, преобладают гелеобразные субмикроструктурные продукты гидратации с повышенной связностью. Поэтому прочность цементного камня в пленочном состоянии выше, чем в объемном, и контактные зоны в бетоне имеют повышенную прочность, что благоприятно сказывается на прочности бетона в целом.

Поскольку бетон является типичным композиционным материалом, то в зависимости от относительного содержания его структурных элементов, которые функционально играют роль упрочняющего и матричного компонентов, получают порфировый, контактный и законтактный типы структур. При *порфировой* макроструктуре зерна заполнителя разделены толстыми прослойками цементирующего вещества, т.е. для первых характерно «плавающее» расположение в материале. Если зерна заполнителя контактируют через тонкие прослойки цементирующего вещества при сохранении ее непрерывности и сплошности, то такую структуру называют *контактной*. При непосредственном контакте зерен, когда вяжущего вещества недостаточно для сохранения своей непрерывности и сплошности, говорят о *законтактной* структуре. С учетом изложенных выше представлений о пленочном и объемном состояниях цементного камня становится очевидным, что оптимальным типом структуры бетона является контакт-

ный тип, так как в таком бетоне значительная часть цементирующего вещества находится в пленочном состоянии, что определяет более эффективное использование вяжущего вещества. Законтактный тип структуры характеризуется пониженной прочностью и проницаемостью для агрессивных веществ. Аналогичные типы структур можно выделить и на *уровне связующего вещества*. С оптимизацией структуры бетона на всех уровнях связано одно из приоритетных направлений развития технологии этого материала.

**Свойства тяжелого бетона.** Основными свойствами бетона являются прочность, деформативные свойства, водонепроницаемость, морозостойкость, стойкость к химической и другим видам коррозии.

*Прочность* бетона характеризуют классами по прочности на сжатие, изгиб, растяжение. Основная характеристика прочности тяжелого бетона – это *класс по прочности на сжатие*, который определяется величиной гарантированной прочности на сжатие с обеспеченностью 95 % образцов бетона базового размера (кубов с ребром 15x15x15 см) в возрасте 28 суток после твердения в нормальных условиях (температура 15 – 20 °С, относительная влажность среды 90 – 100 %). Бетоны подразделяют на классы: *B 3,5; B 5; B 7,5; B 10; B 12,5; B 15; B 20; B 25; B 30; B 35; B 40; B 45; B 50; B 55; B 60*.

На производстве контролируют среднюю прочность бетона на сжатие или марку бетона по прочности на сжатие. Соотношение между классом бетона по прочности на сжатие и его средней прочностью на сжатие выражается уравнением

$$B = R \cdot (1 - 1,64 \cdot \nu),$$

где *B* – класс бетона по прочности на сжатие, МПа; *R* – средняя прочность на сжатие, МПа; 1,64 – значение коэффициента Стьюдента для обеспеченности (уровня доверительной вероятности) 95 %;  $\nu$  – коэффициент вариации прочности бетона на производстве (в долях единицы).

Для перехода от класса бетона к средней прочности, контролируемой на производстве, при нормативном коэффициенте вариации (13,5 %) используют формулу  $R = B / 0,778$ . Например, для класса *B 5* получим среднюю прочность 6,43 МПа, а для класса *B 40* – 51,4 МПа.

Средняя прочность бетона на сжатие на производстве характеризуется *марками по прочности на сжатие* (в десятых долях МПа) – М50, М75, М100, М150, М200, М250, М300, М350, М400, М450, М500, М600 и выше.

Для тяжелых бетонов, применяемых в строительстве дорог и аэродромов, устанавливаются классы и марки бетона по прочности при изгибе.

Прочность бетона зависит в основном от прочности (активности) цемента, качества заполнителей, водоцементного отношения В/Ц, времени и условий твердения. Прочность бетона повышается с увеличением прочно-

сти цемента, улучшением качества заполнителей, уменьшением водоцементного отношения.

Зависимость прочности бетона от водоцементного отношения вытекает из физической сущности формирования структуры цементного камня и бетона и отражает по существу зависимость прочности бетона от его пористости. Указанная зависимость выполняется лишь в определенных пределах. При очень низких В/Ц не удастся получить удобоукладываемые бетонные смеси и их уплотнить, поэтому с уменьшением В/Ц ниже определенного предела, зависящего от эффективности уплотнения смеси, прочность бетона резко падает. Для определения состава бетона применяют зависимость прочности бетона от цементно-водного отношения Ц/В (обратной величины В/Ц), которая для уплотненных смесей в определенном диапазоне изменения Ц/В является прямолинейной.

Путем обобщения опытных данных получены две эмпирические формулы, отражающие зависимости прочности бетона от указанных выше факторов:

а) для обычного бетона при  $В/Ц \geq 0,4$  ( $Ц/В \leq 2,5$ )

$$R_6 = A \cdot R_{ц} (Ц/В - 0,5);$$

б) высокопрочного бетона при  $В/Ц < 0,4$  ( $Ц/В > 2,5$ )

$$R_6 = A_1 \cdot R_{ц} (Ц/В + 0,5),$$

где  $R_6$  – прочность бетона в возрасте 28 суток после твердения при нормальных условиях, МПа;  $A$  и  $A_1$  – коэффициенты, зависящие от качества заполнителей;  $R_{ц}$  – активность цемента, МПа.

Со временем при благоприятных условиях твердения прочность бетона растет. Для ее ориентировочного определения в разном возрасте бетона используют формулу

$$R_n = R_{28} \frac{\lg n}{\lg 28},$$

где  $R_n$ ,  $R_{28}$  – пределы прочности бетона на сжатие в возрасте  $n$  и 28 суток.

Эта формула дает удовлетворительные результаты при  $n > 3$  суток для бетонов, приготовленных на рядовых портландцементях и твердеющих при температуре 15 – 20 °С во влажной среде.

Высыхание бетона приводит к прекращению твердения, поэтому для набора его прочности требуется достаточная *влажность* окружающей среды (или принятие мер по предотвращению испарения влаги из бетона). При понижении *температуры* окружающей среды прочность бетона нарастает медленнее, чем при нормальной. При замерзании бетона его твердение прекращается, при этом замерзание в раннем возрасте вызывает резкое снижение прочности после оттаивания, что недопустимо. Повышение температуры среды по сравнению с нормальной активизирует взаимодей-

ствие цемента с водой и рост прочности бетона. На этом основан способ ускорения твердения бетона с помощью тепловой обработки при условии сохранения влажности окружающей среды.

Среди *деформативных свойств* бетона выделяют усадку, деформации при кратковременном и длительном (ползучесть) нагружениях, температурные деформации. *Усадка* бетона – это уменьшение его объема за счет действия капиллярных и молекулярных сил, проявляющееся со временем при недостаточной влажности среды, способствующей высыханию бетона. При твердении в воде или во влажных условиях усадка резко уменьшается. Быстрое высыхание бетона, особенно в раннем возрасте, приводит к значительной и неравномерной усадке, что вызывает появление усадочных трещин и ухудшение всех качественных показателей материала.

*Водонепроницаемость* бетона зависит от его пористости и ее характера. Бетон мелкопористой структуры, тщательно уплотненный и затвердевший, обладает определенной водонепроницаемостью в слоях достаточной толщины. Для бетонов конструкций, к которым предъявляются требования ограничения проницаемости или повышенной плотности и коррозионной стойкости, назначают марки по водонепроницаемости. Марки тяжелого бетона по водонепроницаемости: W 2; W 4; W 6; W 8; W 10; W 12; W 16; W 18; W 20. Эта характеристика определяется специальными испытаниями и показывает, до какого давления воды (в десятых долях МПа) бетон является для нее непроницаемым.

*Морозостойкость* бетона зависит от его структуры и прежде всего количества капиллярных открытых пор. Капиллярная пористость бетона уменьшается, а его морозостойкость увеличивается при меньших значениях В/Ц и достаточном сроке твердения. Для бетонов конструкций, подвергающихся в процессе эксплуатации попеременному замораживанию и оттаиванию, назначают марки по морозостойкости: F 50; F 75; F 100; F 150; F 200; F 300; F 400; F 500; F 600; F 800; F 1000.

### **6.5. Подбор состава тяжелого бетона**

От правильности проектирования состава тяжелого бетона зависят его плотность и прочность, которые, в свою очередь, во многом определяют такие важные свойства, как морозостойкость, водонепроницаемость и др. Рациональным считается тот состав тяжелого бетона, в котором расход вяжущего минимален при условии получения заданной прочности и других свойств бетона и необходимой удобоукладываемости бетонной смеси.

Состав бетона выражают двумя способами: на стройках в виде соотношения по массе (реже по объему, что менее точно) между расходами цемента, песка и щебня с обязательным указанием В/Ц; на бетонных заводах в виде расхода всех материалов в килограммах на 1 м<sup>3</sup> уложенной и уплотненной бетонной смеси. В первом случае массу или объем цемента принимают за единицу, поэтому соотношение между составными частями

бетона имеет вид 1:Х:У при определенном В/Ц (где Х – количество частей песка; У – количество частей щебня или гравия).

Сначала определяют *номинальный* (лабораторный) состав бетона без учета влажности заполнителей, затем *производственный* (полевой) – с учетом влажности заполнителей.

Подбор состава включает в себя как расчетные операции (определение предварительного состава), так и его проверку на опытных замесах.

**Расчет предварительного состава тяжелого бетона** производят на основе зависимости прочности бетона от активности цемента, цементно-водного фактора и качества заполнителей, а также зависимости подвижности бетонной смеси от расхода воды и других факторов.

Водопотребность бетонной смеси (расход воды на 1 м<sup>3</sup> бетона) назначают в зависимости от ее удобоукладываемости (подвижности или жесткости). Удобоукладываемость смеси, если она не задана, выбирается в зависимости от вида конструкции и способа формирования.

Определение расходов песка и крупного заполнителя основано на формулах, которые вытекают из физических основ структурообразования бетона (*принципы метода абсолютных объемов*):

а) сумма абсолютных объемов всех компонентов бетонной смеси равна 1 м<sup>3</sup> свежееуложенного уплотненного бетона, т.е.

$$\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \text{В} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{п}}} + \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{щ}}} = 1 \text{ м}^3 (1000 \text{ дм}^3);$$

б) цементно-песчаный раствор занимает промежутки между зернами крупного заполнителя с определенной их раздвижкой:

$$\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \text{В} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{п}}} = V_{\text{п}} \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{нщ}}} \alpha ,$$

где Ц, В, П, Щ – расходы соответственно цемента, воды, песка и щебня в килограммах на 1 м<sup>3</sup> бетона;  $V_{\text{п}}$  – пустотность щебня в долях единицы;  $\rho_{\text{щ}}$ ,  $\rho_{\text{п}}$  и  $\rho_{\text{ц}}$  – истинные плотности соответственно щебня, песка и цемента, кг/дм<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{нщ}}$  – насыпная плотность щебня, кг/дм<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент раздвижки зерен щебня раствором ( $\alpha = 1,05 \dots 1,1$  для жестких смесей;  $\alpha = 1,25 \dots 1,4$  для подвижных смесей).

Решая совместно эти два уравнения, получаем формулы для определения расхода заполнителей на 1 м<sup>3</sup> бетона:

$$\text{Щ} = 1000 / (\alpha \cdot V_{\text{п}} / \rho_{\text{нщ}} + 1 / \rho_{\text{щ}}),$$

$$\text{П} = \rho_{\text{п}} \cdot (1000 - \text{Ц} / \rho_{\text{ц}} - \text{В} - \text{Щ} / \rho_{\text{щ}}).$$

Полученный расчетом состав проверяют в лаборатории и при необходимости вносят в него соответствующие поправки.

*Полевой состав* бетона определяют с учетом влажности заполнителей. Для этого находят содержание воды в заполнителях по формулам

$$B_{\text{п}} = W_{\text{п}} \cdot \Pi; \quad B_{\text{щ}} = W_{\text{щ}} \cdot \text{Щ},$$

где  $B_{\text{п}}$ ,  $B_{\text{щ}}$  – содержание воды в песке и щебне, кг;  $W_{\text{п}}$ ,  $W_{\text{щ}}$  – влажность песка и щебня (в долях единицы).

Расход заполнителей увеличивают соответственно с массой содержащейся в них воды. Расход воды уменьшают на величину  $\Delta B = B_{\text{п}} + B_{\text{щ}}$ . Расход цемента не изменяют.

Коэффициент выхода бетона, который представляет собой степень уменьшения объема бетонной смеси по сравнению с суммарным объемом исходных материалов и обычно равен 0,6 – 0,7, вычисляют по формуле

$$\beta = \frac{1000}{\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{нц}}} + \frac{\Pi_{\text{п}}}{\rho_{\text{пп}}} + \frac{\text{Щ}_{\text{п}}}{\rho_{\text{нщ}}}}.$$

При определении состава бетона с химическими добавками учитывают их воздействие на свойства бетона соответствующими коэффициентами. Например, если в бетонную смесь вводят пластификатор (ЛСТ и др.) или суперпластификатор (С-3 и др.), то расход воды уменьшают соответственно на 10 или 20 %. В остальном порядок определения состава бетона не изменяют.

## 6.6. Специальные виды тяжелых бетонов

**Высокопрочный модифицированный бетон.** Отличается высокой прочностью на сжатие (60-80 МПа и выше), высокой плотностью, практически нулевым водопоглощением. Этот бетон получают на основе чистых заполнителей с хорошим зерновым составом (на фракционированном щебне из плотных и прочных горных пород, песке с пустотностью не выше 40 %) с добавками суперпластификатора и дисперсного наполнителя (например, микрокремнезема –  $\text{SiO}_2$  в аморфной форме, имеющего ультратонкие частицы). Высокопрочный бетон применяют для ответственных сооружений (для высотных зданий, защитных сооружений и т.п.).

**Бетон для дорожных и аэродромных покрытий.** К этому бетону предъявляют требования высокой прочности на изгиб, коррозионной стойкости, малого водопоглощения. Получают на основе специальных цементов нормированного минерального состава (ПЦ-500-Н) с содержанием  $\text{C}_3\text{A}$  до 5 %, применением химических добавок (пластификаторов, воздухововлекающих и др.). При изготовлении бетона ограничивают водоцементное отношение ( $B/\text{Ц}$  должно быть не более 0,5 – 0,55).

**Гидротехнический бетон.** Должен иметь высокую прочность, долговечность и в то же время сравнительно низкую стоимость. С этой целью гидротехнические сооружения разделяют на разные (обычно три) зоны,

для которых применяют свой бетон. Для *подводной зоны* используют бетон на пуццолановом портландцементе, который отличается водонепроницаемостью и сульфатостойкостью. Наиболее ответственную зону – *зону переменного уровня* воды – выполняют из высококачественного бетона на сульфатостойком портландцементе. Для *надводной зоны* применяют более дешевый вид бетона на шлакопортландцементе, белитовом портландцементе с меньшим тепловыделением. С целью улучшения свойств в гидротехнический бетон вводят различные добавки, в том числе микронаполнители (микрокремнезем и др.). Важным является правильное назначение В/Ц, от значений которого во многом зависят плотность, прочность и долговечность бетона.

**Бетон для защиты от радиации.** Для защиты от  $\gamma$ -излучения используют *особо тяжелый* бетон на чугунном, свинцовом и другом сверхтяжелом заполнителе. Такие бетоны требуют тщательного подбора состава, соблюдения технологических режимов изготовления и твердения. Нейтронное излучение наиболее эффективно поглощается *гидратными* бетонами, имеющими повышенное содержание химически связанной воды. Для их приготовления чаще всего используют глиноземистый цемент, а в качестве заполнителей – лимонит и серпентин. В бетон вводят добавки, содержащие легкие элементы: литий, фтор и др. Особые требования, прежде всего по долговечности и прочности, предъявляются к бетонам для подземных хранилищ радиоактивных отходов и других захоронений. При их изготовлении обязательно вводят дисперсные наполнители (микрокремнезем и др.) в композиции с суперпластификатором.

**Декоративный (архитектурный) бетон** предназначен для отделки зданий и сооружений. Применяются светлые, цветные и офактуренные (имитирующие природный камень и т.п.) бетоны. В качестве вяжущего используют белый портландцемент, цветные цементы, иногда используют обычный портландцемент с отбеливающей добавкой и (или) с добавкой пигмента. Мелким заполнителем обычно служит природный песок. Для получения бетонов *светлых тонов* применяют белые кварцевые пески (для стекольной промышленности). В качестве крупного заполнителя используют щебень из мрамора, гранита, известняка, доломита. Для получения *цветного* бетона на белом цементе в бетонную смесь добавляют различные минеральные и органические пигменты. Для достижения высокой прочности и долговечности *архитектурного* бетона в него вводят дисперсные наполнители (микрокремнезем и др.) в композиции с суперпластификатором и другие добавки.

**Жаростойкий бетон** предназначен для изделий и конструкций, работающих в условиях длительного воздействия высоких температур (свыше 200 °С). Этот бетон изготавливают на портландцементе с активными минеральными (жаростойкими) добавками, глиноземистом цементе, жидком



стекле с добавкой отвердителя – кремнефтористого натрия, а также жаростойких заполнителях (шамоте, магнезите, хромомagneзите и др.).

**Бетоны химически стойкие** предназначены для изделий и конструкций, работающих в условиях воздействия агрессивных сред: минеральных и органических кислот, солей и оснований, растворителей и нефтепродуктов. Их изготавливают на основе фурановых, фураноэпоксидных, карбамидных, акриловых синтетических смол (*полимербетоны*), жидкого стекла с добавкой отвердителя – кремнефтористого натрия (*жидкостекольные бетоны*), жидкого стекла с полимерной добавкой (*полимерсиликатные бетоны*), серы (серные композиты). Используют химически стойкие заполнители: базальт, андезит, диабаз и др.

**Бетоны с компенсированной усадкой и напрягающие бетоны.** Это бетоны на основе расширяющихся и напрягающих цементов, предназначенные для получения водонепроницаемых и самонапряженных (из напрягающего бетона) конструкций. Использование специальных цементов, а также соответствующих добавок обуславливает компенсацию усадки бетона и даже определенное остаточное расширение, что позволяет получить плотную структуру и, соответственно, высокую степень водо- и газонепроницаемости (марка по водонепроницаемости не ниже W 12). Кроме того, эти бетоны отличаются высокой морозостойкостью (марка от F 300 до F 1000 и более).

**Мелкозернистый бетон** характеризуется максимальной крупностью заполнителей до 10 мм. К таким бетонам относятся *песчаные бетоны* (*пескобетоны*). Ранее производство мелкозернистых бетонов сдерживалось необходимостью увеличения расхода воды и цемента вследствие большой удельной поверхности заполнителей. В настоящее время развитие технологии бетона позволяет за счет специальных мер ликвидировать этот недостаток и в полной мере ощутить достоинства таких бетонов, а именно: возможность создания однородной структуры, отказ от дорогостоящего крупного заполнителя, возможность получения качественной поверхности изделий при формовании методами прессования, вибропрессования, вибролитья, легкая транспортируемость, в том числе по трубопроводам, эффективность армирования дисперсной арматурой (фибробетоны) и др. Для снижения расхода воды и цемента следует применять крупные чистые пески с хорошим зерновым составом, химические добавки (суперпластификаторы), интенсивное уплотнение бетонной смеси.

### 6.7. Легкие и особо легкие бетоны

В современном строительстве наибольшее значение приобрело комплексное решение двух взаимосвязанных проблем: повышение теплозащитных свойств ограждающих конструкций и уменьшение материалоемкости строительства. Одним из путей решения этих проблем может быть применение для изготовления конструкций легких и особо легких бетонов.

К этим бетонам относятся бетоны на пористых заполнителях, в том числе поризованные и крупнопористые, бетоны на легких органических заполнителях и ячеистые бетоны. Легкие и особо легкие бетоны используют для снижения массы несущих конструкций и в ограждающих конструкциях, поэтому для них наряду с прочностью очень важна плотность, которая характеризуется соответствующими марками.

**Бетоны на пористых заполнителях.** Для их изготовления в качестве крупного заполнителя применяют легкие заполнители с пористой структурой – природные (пемза, вулканические туфы) и искусственные (керамзит, аглопорит, вспученные перлит и вермикулит).

*Керамзит* (керамзитовый гравий) получают путем обжига гранул, приготовленных из вспучивающихся глин. Это легкий и прочный заполнитель насыпной плотностью 250-800 кг/м<sup>3</sup>. В процессе обжига (до 1200°C) легкоплавкая глина переходит в пиропластическое состояние и вспучивается вследствие выделения внутри каждой гранулы газообразных продуктов. В изломе гранула керамзита имеет структуру застывшей пены. Спекшаяся оболочка, покрывающая гранулу, придает ей высокую прочность.

*Керамзитовый песок* (зерна до 5 мм) получают при производстве керамзитового гравия (в небольших количествах), а также по методу кипящего слоя обжигом глиняных гранул во взвешенном состоянии. Кроме того, его можно получать дроблением зерен гравия размером более 50 мм и сваров.

*Шлаковую пемзу* изготавливают путем быстрого охлаждения расплава металлургических (обычно доменных) шлаков, приводящего к вспучиванию. Куски шлаковой пемзы дробят и рассеивают, получая пористый щебень. Производство шлаковой пемзы налажено в районах развитой металлургии. Здесь себестоимость шлаковой пемзы ниже, чем керамзита.

*Вспученный перлит* изготавливают путем обжига водосодержащих вулканических стеклообразных пород (перлитов, обсидианов). При 950-1200 °C вода выделяется и перлит увеличивается в объеме в 10-20 раз.

*Вспученный вермикулит* – пористый сыпучий материал, полученный путем термической обработки водосодержащих слюд. Этот заполнитель, как и вспученный перлит, используют для изготовления теплоизоляционных легких бетонов.

*Аглопорит* получают при обжиге глиносодержащего сырья с добавкой 8-10 % твердого топлива (на решетках агломерационных машин). Каменный уголь выгорает, а частицы сырья спекаются.

По насыпной плотности в сухом состоянии (кг/м<sup>3</sup>) пористые заполнители разделяют на *марки*: 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 и 1200.

Наивыгоднейшее сочетание показателей плотности, теплопроводности, прочности и расхода цемента для легких бетонов достигается при наибольшем насыщении бетона пористым заполнителем, что требует сбли-

женного размещения зерен заполнителя в объеме бетона. В этом случае в бетоне будет содержаться меньше цементного камня, являющегося самой тяжелой частью легкого бетона. Наибольшее насыщение бетона пористым заполнителем возможно только при правильном подборе его зернового состава с одновременным использованием технологических факторов (интенсивного уплотнения, пластификаторов). Рекомендации по рациональному зерновому составу содержатся в стандартах на каждый вид пористого заполнителя.

Прочность легких пористых заполнителей невелика, обычно ниже прочности цементного раствора. Однако хорошее сцепление между ним и зернами пористого заполнителя (эффект «цементной обоймы») обеспечивает высокую прочность бетона в целом.

Пористые заполнители обладают значительным водопоглощением и при затворении бетонной смеси отсасывают часть воды. Поэтому по сравнению с тяжелым бетоном равноподвижные легкобетонные смеси требуют увеличения расхода воды. При этом в легком бетоне отчетливо проявляется вредное влияние как недостатка, так и избытка воды. Благодаря тому, что часть воды затворения аккумулируется пористым заполнителем, а затем отдается цементу по мере твердения бетона, твердение легкого бетона меньше зависит от влажностных условий, а усадочные деформации в цементном камне имеют меньшую величину. В результате легкий бетон на пористых заполнителях обладает высокой однородностью структуры и малой проницаемостью, что обеспечивает высокую прочность (10 – 40 МПа и выше) и долговечность конструкций и сооружений.

В качестве мелкого заполнителя используют обычно природный песок. Искусственные пористые пески, несмотря на значительно лучшие результаты, вследствие дефицитности и дороговизны применяют редко.

Основным показателем *прочности* легкого бетона является класс бетона по прочности при сжатии; установлены следующие *классы*, МПа: *B* 2; *B* 2,5; *B* 3,5; *B* 5; *B* 7,5; *B* 10; *B* 12,5; *B* 15; *B* 17,5; *B* 20; *B* 22,5; *B* 25; *B* 30; *B* 40; для теплоизоляционных бетонов предусмотрены, кроме того, классы: *B* 0,35; *B* 0,75; *B* 1.

*Прочность* легкого бетона  $R$ , по Н. А. Попову, зависит от марки цемента, цементно-водного отношения, прочности пористого заполнителя и может быть приближенно определена по формуле, имеющей в определенных границах Ц/В такой же вид, как и для тяжелых бетонов:

$$R = A_2 R_{\text{ц}} (\text{Ц/В} - \epsilon_2),$$

где  $A_2$  и  $\epsilon_2$  – безразмерные параметры.

Чем ниже прочность пористого заполнителя, тем меньше значения  $A_2$  и  $\epsilon_2$ .

При оптимальном количестве воды затворения, подобранном для применяемых цемента и заполнителей, прочность легкого бетона зависит

главным образом от активности  $R_{\text{ц}}$  и расхода цемента  $\text{Ц}$  (формула Н. А. Попова):

$$R = kR_{\text{ц}}(\text{Ц} - \text{Ц}_0),$$

где  $k$  и  $\text{Ц}_0$  – параметры, определяемые путем испытания образцов бетона, изготовленных с оптимальным количеством воды, но с разными расходами цемента и твердевших в тех же условиях, что и легкобетонные изделия.

Наряду с прочностью важной характеристикой легкого бетона является *плотность*. В зависимости от плотности в сухом состоянии ( $\text{кг/м}^3$ ) легкие бетоны подразделяют на *марки*:  $D\ 200$ ;  $D\ 300$ ;  $D\ 400$ ;  $D\ 500$ ;  $D\ 600$ ;  $D\ 700$ ;  $D\ 800$ ;  $D\ 900$ ;  $D\ 1000$ ;  $D\ 1100$ ;  $D\ 1200$ ;  $D\ 1300$ ;  $D\ 1400$ ;  $D\ 1500$ ;  $D\ 1600$ ;  $D\ 1700$ ;  $D\ 1800$ ;  $D\ 1900$ ;  $D\ 2000$ .

*Теплопроводность* легких бетонов зависит в основном от плотности и влажности и для марок  $D\ 600$ – $D\ 1800$  изменяется от 0,15 до 0,75 Вт/(м · °С). Увеличение объемной влажности легкого бетона на 1 % повышает его теплопроводность на 0,016–0,035 Вт/(м · °С).

По *морозостойкости* легкие бетоны делят на марки:  $F\ 25$ ;  $F\ 35$ ;  $F\ 50$ ;  $F\ 75$ ;  $F\ 100$ ;  $F\ 150$ ;  $F\ 200$ ;  $F\ 300$ ;  $F\ 400$ ;  $F\ 500$ . Для наружных стен обычно применяют бетоны морозостойкостью не менее 25 циклов попеременного замораживания и оттаивания,

Установлены следующие марки бетона на пористом заполнителе по *водонепроницаемости*:  $W\ 2$ ;  $W\ 4$ ;  $W\ 6$ ;  $W\ 8$ ;  $W\ 10$ ;  $W\ 12$ . Характерно, что со временем водонепроницаемость легких бетонов повышается.

Возможность получения легких бетонов с высокой морозостойкостью и малой водопроницаемостью значительно расширяет области их применения. Бетоны на пористых заполнителях успешно используют в мостостроении, гидротехническом строительстве.

Для обычных легких бетонов слитной структуры с природным песком в качестве мелкого заполнителя, в которых цементно-песчаный раствор полностью заполняет пустоты между зернами крупного пористого заполнителя, характерна достаточно большая плотность (1400 – 1800  $\text{кг/м}^3$ ), что снижает эффективность их применения, прежде всего в ограждающих конструкциях. Более эффективными по сравнению с легкими бетонами *слитной структуры* как с точки зрения снижения плотности, так и возможности отказа от дефицитного мелкого пористого заполнителя являются *поризованные* легкие бетоны, в которых роль мелкого заполнителя выполняют мелкие замкнутые поры, получающиеся за счет поризации растворной части с помощью пено- или газообразующих добавок, а также *крупнопористые* легкие бетоны контактного омоноличивания, в которых не содержится песок и сохраняются крупные межзерновые пустоты. Эти бетоны могут выполнять как конструкционно-теплоизоляционные функции (при плотности 500 – 1400  $\text{кг/м}^3$ ), так и теплоизоляционные функции (при плотности менее 500  $\text{кг/м}^3$ ). Необходимо учитывать, что крупнопористые бетоны характеризуются высокой проницаемостью и требуют защиты от воздейст-

вий внешней среды. Поэтому их целесообразно применять, например, в качестве внутреннего теплоизоляционного слоя слоистых ограждающих конструкций и в других аналогичных случаях.

**Легкие бетоны на органических заполнителях** являются альтернативой бетонам на пористых минеральных заполнителях. Органическими заполнителями являются, например, вещества растительного происхождения: специально измельченная древесина (дробленка), а также отходы деревообработки и сельскохозяйственного производства – стружка, опилки, солома, льняная костра и т.п. В последнее время в качестве легкого заполнителя бетона все шире используют вспученные гранулы полистирола. Основная проблема при получении легких бетонов на органических заполнителях – плохое сцепление этих заполнителей с цементным камнем, а при применении растительных заполнителей – способность к выделению веществ, препятствующих твердению цемента (так называемых «цементных ядов»). Кроме того, органические заполнители при определенных условиях могут гнить или подвергаться биоповреждениям.

В зависимости от вида органического заполнителя различают виды бетонов: арболит, опилкобетон, костробетон, полистиролбетон и т.п. Чаще всего эти бетоны получают на цементном вяжущем. В то же время известны материалы, аналогичные по принципам построения структуры рассматриваемым бетонам, на других видах вяжущих как минеральных – гипсовых, магнезиальных и др., так и органических – битумных, полимерных и др. Применение этих вяжущих часто решает указанные выше проблемы и позволяет относительно легко получать достаточно прочные материалы. Однако при этом возникают свои недостатки и особенности применения, связанные со свойствами данных вяжущих (например, малая водостойкость – для гипсовых и магнезиальных вяжущих, дороговизна – полимерных и т.д.).

*Арболит* – это бетон на цементном вяжущем и специально измельченной древесине – дробленке. Для получения заданных свойств в него вводят различные химические добавки: хлористый кальций, жидкое стекло и другие, способствующие минерализации древесного заполнителя и ускорению твердения цемента, а также добавки-антисептики, антипирены и т.д. Арболит в зависимости от средней плотности в сухом состоянии подразделяют на теплоизоляционный ( $\rho_0 < 500 \text{ кг/м}^3$ ) и конструктивно-теплоизоляционный ( $\rho_0 = 500...850 \text{ кг/м}^3$ ). По прочности на сжатие первая разновидность арболита имеет классы от  $B 0,35$  до  $B 1,0$ , вторая – от  $B 1,5$  до  $B 3,5$ . Наружная поверхность изделий из арболита, соприкасающаяся с атмосферной влагой, должна иметь отделочный фактурный слой, обеспечивающий защиту материала от увлажнения.

В настоящее время возрождается интерес к *опилкобетону*, получаемому на основе широко распространенных отходов деревообработки. Традиционный опилкобетон, в состав сырьевой смеси которого входят цемент,

опилки, песок и вода, характеризуется сравнительно высокой плотностью ( $1000 - 1600 \text{ кг/м}^3$ ) и низкой прочностью и не отвечает современным требованиям. Последние достижения в технологии производства этого материала, направленные на улучшение адгезии цементного камня к древесному заполнителю и блокированию «цементных ядов», позволяют снизить содержание песка в составе опилкобетона, увеличивающего его плотность, и получать легкие и достаточно прочные изделия (стеновые камни, блоки и др.) для малоэтажного строительства.

**Ячеистые бетоны.** Идея получения поризованных бетонов принадлежит пражскому инженеру Гофману, получившему в 1889 г. патент на изготовление бетонов, пористая структура которых образовывалась за счет выделения углекислого газа при реакции соляной кислоты и гидрокарбоната натрия ( $\text{NaHCO}_3$ ). Ячеистые бетоны по плотности и назначению делят на теплоизоляционные с плотностью  $300...600 \text{ кг/м}^3$  и прочностью  $0,4-1,2 \text{ МПа}$  (иногда называемые поробетонами) и конструктивные с плотностью  $600 - 1400 \text{ кг/м}^3$  и прочностью  $2,5-15 \text{ МПа}$  (поризованные бетоны). Кроме того, в последнее время появились ультралегковесные поробетоны с пониженной средней плотностью ( $150...300 \text{ кг/м}^3$ ). Пористая структура ячеистым бетонам может придаваться двумя основными путями: а) воздухововлечением, когда сырьевую смесь вяжущего, мелкого заполнителя и воды смешивают с отдельно приготовленной пеной или вводят добавку-пенообразователь непосредственно в специальный смеситель; после отвердевания получают так называемый *пенобетон*; б) газообразованием, когда в сырьевую смесь вводят добавку-газообразователь; в результате газовыделения смесь вспучивается, и после ее отвердевания получают так называемый *газобетон*.

*Ячеистые бетоны* – это особо легкие бетоны с большим количеством (до 85 % и более от общего объема бетона) мелких и средних пор (ячеек) размером до 1-1,5 мм. По условиям твердения ячеистые бетоны могут быть автоклавные (твердеющие в автоклавах в среде насыщенного водяного пара под давлением  $0,8 - 1 \text{ МПа}$  и при температуре  $170 - 190 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и неавтоклавные (твердеющие в результате тепловлажностной обработки или в естественных условиях). *Автоклавные* ячеистые бетоны обычно изготавливают на известково-песчаном или другом смешанном известковом вяжущем (газосиликат и пеносиликат). Для ячеистых бетонов *неавтоклавного твердения* применяют цементное вяжущее (портландцемент марки не ниже М400).

*Кремнеземистый компонент* ячеистых бетонов, в качестве которого могут выступать песок, зола и др., с целью повышения однородности структуры межпоровых перегородок, как правило, дополнительно измельчают. В качестве *добавки-газообразователя* при получении газобетонов обычно используют алюминиевую пудру, при взаимодействии которой со щелочью (известью) выделяется водород. В качестве *добавок-*

*пенообразователей* используют синтетические или белковые ПАВ, способствующие получению устойчивых пен. В последние годы в связи с созданием эффективных пенообразователей все большее распространение получают неавтоклавные пенобетоны, что обусловлено стремлением упростить изготовление этого материала, сократить энергозатраты на производство и иметь возможность применять его в условиях строительной площадки. При этом пенобетоны отличаются от газобетонов характером своей структуры – замкнутой пористостью с мелкими сферическими порами. Газобетон имеет крупные поры, поэтому он в большей степени, чем пенобетон, нуждается в защите от воздействий окружающей среды.

Плотность неавтоклавного газобетона обычно находится в пределах  $400 - 900 \text{ кг/м}^3$ , а прочность на сжатие –  $0,5 - 3,5 \text{ МПа}$ . Газосиликат отличается более высокими строительно-техническими свойствами (при плотности  $300 - 600 \text{ кг/м}^3$  прочность на сжатие составляет  $0,75 - 3,5 \text{ МПа}$ ). Плотность пенобетона (с использованием в качестве заполнителя мелкого песка естественной дисперсности) обычно находится в пределах  $600 - 1000 \text{ кг/м}^3$ , а прочность на сжатие  $0,5 - 3,5 \text{ МПа}$ . Для получения пенобетонов с меньшей средней плотностью используют молотые пески. Иногда с целью снижения плотности и исключения операции помола пенобетон получают на цементном вяжущем без песка. Такой материал называют пеноцементом. Однако этот бетон обладает большой усадкой при высыхании, что снижает его качественные показатели. Получение ячеистых бетонов с пониженной средней плотностью и ультралегковесных поробетонов плотностью  $150-300 \text{ кг/м}^3$  возможно за счет использования пеногазовой технологии, при которой используется комбинированный *порообразователь* (газообразователь совместно с пенообразователем), а также ускорители твердения, редуцирующие, водопонижающие и другие добавки.

Пористая структура ячеистых бетонов позволяет легко пилить, сверлить, обрабатывать строительные изделия, появляется возможность модифицировать элементы на строительной площадке. Ячеистый бетон отличается хорошей гвоздимостью. За счет малой массы ячеистобетонных изделий исчезает потребность в автомобильном транспорте и кранах с большой грузоподъемностью.

*Поризованные* бетоны отличаются высокой универсальностью, относительной простотой технологии, невысоким уровнем производственных затрат при изготовлении изделий. Это предопределено тем, что получение бетонов в широком диапазоне значений плотности возможно на одном и том же оборудовании с использованием в качестве заполнителя песка естественной дисперсности. Возможность исключения из технологии поризованных бетонов тепловой обработки обеспечивает реальность их эффективного применения в монолитном строительстве.

Наиболее распространённая продукция из ячеистого бетона – это стеновые блоки и камни различных размеров. Как минимум такое изделие по

объёму заменяет двенадцать штук силикатного кирпича (при весе в три-четыре раза меньшем), а по теплозащитным свойствам для получения одинакового эффекта толщину стены можно уменьшить в пять-шесть раз. Ячеистобетонные блоки можно применять в несущих наружных стенах домов малой и средней (до 4-5) этажности, а также в ненесущих наружных стенах многоэтажных зданий при соблюдении приемлемой по конструктивным и экономическим соображениям толщины стен. Ячеистый бетон в конструкции наружных стен может удачно сочетаться с кирпичной облицовкой. Сочетание поризованного бетона прочностью 5 – 15 МПа как материала для несущих облегченных элементов малоэтажных зданий, ячеистых бетонов пониженной средней плотности и ультралегковесных поробетонов как материала для ограждающих конструкций позволяет обеспечивать современные требования к теплоэффективности жилых домов.

### 6.8. Железобетон

*Железобетон – это композиционный материал, в котором бетон (матрица) и стальная арматура образуют единую систему.* Бетон имеет высокую прочность на сжатие, но низкую прочность на растяжение и изгиб. В железобетоне арматуру располагают так, чтобы она воспринимала растягивающие напряжения, а сжимающие напряжения передавались на бетон. Это обеспечивает хорошую работу композиционного материала в изгибаемой конструкции. Совместной работе бетона и арматуры способствует то, что бетон хорошо сцепляется со стальной арматурой; сталь и бетон имеют близкие температурные коэффициенты линейного расширения; стальная арматура в цементном бетоне не подвергается коррозии.

По виду армирования различают изделия с обычным армированием и предварительно напряженные. При *обычном* армировании в растянутой зоне изгибаемой конструкции возникают трещины, так как предельная растяжимость бетона в 5-6 раз меньше, чем стали. Это не признак того, что конструкция исчерпала свою несущую способность, но при этом возникает опасность коррозии арматуры вследствие нарушения защитного слоя бетона, и долговечность конструкции резко снижается. В *предварительно напряженном* железобетоне арматуру предварительно напрягают (растягивают), а после твердения бетона освобождают от натяжения. Стремлению арматуры сократиться препятствует бетон, при этом в нем возникают сжимающие напряжения (предварительное обжатие), а в арматуре сохраняются предварительные растягивающие напряжения. Эти напряжения в дальнейшем будут суммироваться с соответствующими напряжениями от эксплуатационных нагрузок. Хотя предварительное напряжение железобетона требует применения высокопрочных стали и бетона, в целом эффективность этого композиционного материала существенно повышается вследствие возможности раскрытия потенциальных ресурсов бетона и стали и



резкого увеличения трещиностойкости и долговечности железобетонных конструкций.

**Дисперсноармированный (волоконистый) бетон.** Для армирования этого бетона применяют различные металлические и неметаллические (стеклянные, базальтовые, асбестовые, углеродные, полимерные и др.) волокна. Стальными и неметаллическими волокнами армируют, как правило, мелкозернистые бетоны, иногда цементный камень. При использовании металлических фибр получают *фибробетон*. Материалы, армированные асбестовыми волокнами, называют *асбестоцементом*.

Дисперсное армирование бетона повышает его трещиностойкость, прочность на растяжение, ударную вязкость, сопротивление истиранию. Эффективность применения волокон в бетоне зависит от их содержания. Дисперсное армирование приостанавливает развитие волосящих трещин лишь при расстоянии между отдельными волокнами не более 10 мм, поэтому применение в бетоне крупного заполнителя снижает эффективность подобного армирования. Стальные фибры вводят в бетонную смесь в количестве 1 – 2,5 % объема бетона (3 – 9 % по массе), что обычно составляет 70 – 200 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона. При этом повышаются прочность бетона на растяжение (на 10-30 %), ударная прочность, износостойкость.

## 7. СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАСТВОРЫ

### 7.1. Основные понятия и классификация

*Строительный раствор* – это искусственный каменный материал, получаемый затвердеванием рационально составленной смеси вяжущего, мелкого заполнителя, воды и добавок. В большинстве случаев от раствора не требуется высокой прочности, так как он, как правило, применяется в тонких слоях и, например в случае использования в качестве кладочного раствора, скрепляет между собой более прочные кирпичи и камни, причем прочность кладки в целом зависит не столько от прочности раствора, сколько от того, как он заполняет все неровности и швы в кладке, и чем тоньше слой раствора, тем более низкой может быть его прочность. Поэтому основным свойством этого материала является пластичность (удобоукладываемость) растворной смеси. Поскольку растворную смесь часто укладывают на пористое основание, то большое значение имеет ее водонепроницающая способность. Адгезия (сцепление) раствора к основанию имеет определяющее значение для приклеиваемых составов. Для гидроизоляционных растворов основной характеристикой является водонепроницаемость. Указанных свойств у растворов добиваются не увеличением расхода вяжущего, что неэффективно, а применением различных добавок. Среди них важнейшими являются тонкодисперсные минеральные вещества или наполнители (известь, зóлы, тонкомолотые шлаки, дисперсные от-

ходы камнедробления и камнеобработки), которые значительно повышают пластичность и водоудерживающую способность растворов.

По *виду вяжущего* растворы делят: на цементные, известковые, гипсовые, смешанные (цементно-известковые, известково-гипсовые и т.п.).

По *плотности* различают тяжелые (обычные) растворы (плотность 1500 – 2200 кг/м<sup>3</sup>) и легкие растворы (плотность менее 1500 кг/м<sup>3</sup>). В легких растворах обычный песок заменяют шлаковым песком или другим мелким пористым заполнителем.

По *назначению* растворы бывают кладочные, монтажные, штукатурные, специальные (декоративные, теплоизоляционные и др.).

## 7.2. Свойства растворов

Под *удобоукладываемостью* растворной смеси понимают ее способность укладываться на основание тонким однородным слоем. Удобоукладываемость характеризуется подвижностью, которая определяется как глубина погружения металлического конуса массой 300 г в растворную смесь под действием собственного веса, выраженная в сантиметрах. Например, для кладочных растворов подвижность должна быть в пределах 9-13 см, монтажных растворов – 4-6 см и т.д. Как и в бетоне, подвижность растворной смеси определяется расходом воды. В то же время с целью достижения необходимой водоудерживающей способности в составе раствора необходимо достаточное количество тонкодисперсных наполнителей, которое может скомпенсировать относительно небольшой расход вяжущего. В настоящее время для специальных растворов с высокими требованиями по водоудерживающей способности (выравнивающие, приклеивающие составы и т.п.) используют высокоэффективные органические добавки, например эфиры целлюлозы и другие.

Основными свойствами раствора в затвердевшем состоянии являются прочность, сцепление раствора с основанием, морозостойкость и др.

*Прочность* строительного раствора определяется на образцах 70×70×70 мм, которые при подвижности смеси более 5 см изготавливаются в формах без дна, установленных на пористое основание – кирпич, покрытый смоченной водой бумагой. По среднему значению предела прочности на сжатие серии из трех образцов в возрасте 28 суток определяют марку раствора (М4, М10, М25, М50, М75, М100, М150, М200, М300).

Н.А. Попов предложил определять прочность строительных растворов  $R_{\text{раств}}$  (в МПа) в возрасте 28 суток по формуле

$$R_{\text{раств}} = K \cdot R_{\text{ц}} (\text{Ц} - 0,05) + 4,$$

где  $R_{\text{ц}}$  – активность цемента, МПа; Ц – расход цемента в тоннах на 1 м<sup>3</sup> песка;  $K$  – эмпирический коэффициент, зависящий от качества песка и минеральной добавки, а также тщательности смешивания раствора. В первом

приближении для цементно-известковых растворов в случае крупного песка  $K = 2,2$ ; среднего –  $K = 1,8$ ; мелкого –  $K = 1,4$ .

В тощих растворах с мелкопористой структурой на их прочность заметно влияет объем воздушной фазы, поэтому прочность таких растворов можно определить по предложенной в 1896 г. формуле Фере

$$R_{\text{раств}} = K \left( \frac{C_{\text{ц}}}{C_{\text{ц}} + B + V_{\text{воз}}} \right)^2,$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий активность цемента, крупность песка и другие факторы и наиболее просто определяемый опытным путем;  $C_{\text{ц}}$ ,  $B$ ,  $V_{\text{воз}}$  – абсолютные объемы цемента ( $C_{\text{ц}} = \Pi/\rho_{\text{ц}}$ ), воды и воздуха.

На прочность растворов, особенно смешанных и состоящих из большего числа компонентов, сильно влияет качество перемешивания. Тщательное перемешивание обеспечивает при минимально необходимых расходах вяжущего и воды требуемую подвижность смеси и прочность раствора.

*Сцепление* раствора с основанием зависит от многих факторов и, как правило, возрастает в логарифмической зависимости от прочности раствора. Поэтому более эффективное улучшение адгезионных свойств раствора и повышение его сцепления с основанием достигаются за счет введения в состав раствора водорастворимых полимерных добавок (поливинилацетата, поливиниловых спиртов и др.).

По *морозостойкости* растворы делят на марки:  $F 10$ ,  $F 15$ ,  $F 25$ ,  $F 35$ ,  $F 50$ ,  $F 75$ ,  $F 100$ ,  $F 150$ ,  $F 200$ ,  $F 300$ . Морозостойкость раствора в основном зависит от тех же факторов, что и морозостойкость бетона. Значительное повышение морозостойкости раствора достигается применением поверхностно-активных (воздухововлекающих) добавок.

### 7.3. Сухие строительные смеси

*Сухие строительные смеси (ССС)* – это тщательно перемешанные композиции рационального состава, в которые в сухом виде входят вяжущие вещества, фракционированные заполнители, тонкодисперсные минеральные компоненты, химические добавки. Широкое применение в настоящее время сухих строительных смесей обусловлено расширением номенклатуры растворов, необходимостью обеспечения их качества в условиях их многокомпонентности и использования малых и сверхмалых количеств химических добавок (что практически невозможно при непосредственном приготовлении растворных смесей на строительной площадке).

Сухие строительные смеси подразделяются на простые (бездобавочные) и модифицированные. Наличие большого числа добавок, введенных в строго необходимом количестве, – одно из главных отличий модифицированной сухой смеси от товарного раствора, позволяющее регулировать в

достаточно широком диапазоне как строительно-технологические, так и эксплуатационные свойства смесей. Использование модифицированных различными добавками сухих смесей позволяет реализовать тонкослойные технологии при выполнении плиточных и штукатурных работ, устройстве полов, при выравнивании стен и потолков.

*Модификаторы*, или добавки, вносимые в смесь в небольших количествах (от 0,5 до 8 % общего объёма смеси), радикально изменяют физико-химические характеристики смеси. В результате она приобретает новые, улучшенные эксплуатационные свойства.

Эти новые свойства сухим смесям придают в частности *водорастворимые полимеры*. В течение 20-30 минут строительный раствор сохраняет пластичность при оптимальном водоцементном отношении. Благодаря медленному высыханию, исключается появление трещин. Увеличиваются эластичность и предел прочности при сжатии, растяжении и изгибе. Повышается фиксирующая способность на различных поверхностях (бетоне, стали, пористых материалах), в том числе и на таких, с которыми цементный раствор склеивается плохо (дерево, пластмасса). Компенсируются деформации, возникающие из-за неодинакового линейного расширения основы и покрытия. Слой штукатурки или клея удаётся сделать значительно тоньше обычного. Всё это расширяет возможности строителей и реставраторов и поднимает качество отделочных работ на значительно более высокий уровень.

Для дальнейшего улучшения свойств сухих смесей водорастворимые полимеры применяют в сочетании с релаксационными порошками.

*Релаксационные порошки* – вторая группа модификаторов сухих смесей. В водном растворе сухой смеси релаксационный порошок превращается в клеевую полимерную субстанцию, которая после высыхания оставляет эластичные мостики в порах наносимого на основу отделочного материала и на его границе с основой. Эти мостики имеют прочность на разрыв более 5 МПа, что обеспечивает высокую адгезию с основой штукатурки, шпатлёвки или клея. Одновременно повышается эластичность при нанесении раствора на основу, а также влагостойкость и прочность на изгиб и истираемость.

Важной характеристикой релаксационного порошка является минимальная температура плёнообразования, ниже которой полимерные частички теряют эластичность. Чем ниже минимальная температура плёнообразования, тем легче работать в холодное время года. Некоторые из релаксационных порошков дают возможность вести отделочные работы зимой без потери качества.

Наряду с водорастворимыми полимерами и релаксационными порошками применяют, хотя и значительно реже, другие добавки (пластификаторы, замедлители схватывания, гидрофобизаторы, пеногасители и т.д.).

Завод сухих смесей, который имеет несколько силосов для песка, позволяет выполнить раздельное дозирование мелкой, средней и крупной фракций в необходимом количестве, но только в том случае, если песок перед загрузкой будет высушен и разделен на фракции нужных размеров. При этом влажность песка и наполнителей не должна превышать 0,1 %.

Изготавливаемые в настоящее время цементно-песчаные сухие смеси производятся на основе традиционно выпускаемого портландцемента марок ПЦ-400 или ПЦ-500, что не всегда экономически и технологически оправданно. Вместе с тем большинство регионов страны располагает достаточными запасами местных материалов для организации производства наполненных композитных вяжущих низких и средних марок и сухих строительных смесей на их основе.

## 8. СИЛИКАТНЫЕ ИЗДЕЛИЯ АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

*К силикатным изделиям автоклавного твердения относят материалы, получаемые из сырьевой смеси известково-кремнеземистого вяжущего и минеральных заполнителей путем гидротермального синтеза гидросиликатов кальция, осуществляемого при повышенных значениях давления и температуры водяного пара.*

В 1880 г. В. Михаэлисом был предложен способ получения известково-песчаных изделий путем обработки в среде насыщенного водяного пара при его повышенной (выше 100 °С) температуре и избыточном (выше атмосферного) давлении в автоклаве. Современная технология автоклавных материалов включает в себя получение разнообразных изделий различного назначения из известково-песчаных, известково-шлаковых и других сырьевых смесей. Наиболее распространены известково-песчаные (силикатные) материалы и изделия. За 8-12 ч автоклавной обработки при температуре 174 – 200 °С и давлении 0,8 – 1,6 МПа насыщенного водяного пара из уплотненной смеси извести и песка получают изделия с прочностью до 30-40 МПа. В автоклаве идет взаимодействие между гидроксидом кальция, кремнеземом  $\text{SiO}_2$  и водой с образованием (синтезом) малорастворимых гидросиликатов кальция (ГСК). Иногда этот процесс называют гидросиликатным твердением извести. Эти цементирующие соединения отличаются высокой клеящей способностью и водостойкостью. Они связывают частицы заполнителя (зерна песка) в монолит. Таким образом, в силикатных изделиях песок играет двоякую роль – компонента вяжущего и заполнителя. Для повышения реакционной способности песка его часть размалывают (совместно с известью). Измельченную смесь извести и песка называют *известково-песчаным вяжущим*. К силикатным изделиям и материалам относятся силикатный кирпич и камни, а также силикатный бетон.

**Силикатный кирпич и камни** – это стеновые изделия, получаемые путем прессования известково-песчаной смеси (с влажностью 5-8 %) с по-

следующим твердением в автоклаве. В сырьевой смеси содержание извести составляет от 6 до 10 % в пересчете на активный СаО.

Силикатный кирпич изготавливают двух видов: *одинарный* (размерами 250×120×65 мм) и *утолщенный* (размерами 250×120×88 мм). Размеры *силикатных камней* — 250×120×138 мм. Кирпич изготавливают полнотелым (только одинарный) и пустотелым, камни — только пустотелыми. В зависимости от *назначения* изделия выпускают *рядовыми* и *лицевыми* (с повышенными требованиями к внешнему виду).

В зависимости от *средней плотности* (структуры материала) полнотелые изделия подразделяются на *пористые* (с применением пористых заполнителей) со средней плотностью до 1500 кг/м<sup>3</sup> и *плотные* со средней плотностью свыше 1500 кг/м<sup>3</sup>. По *прочности* силикатные кирпич и камни изготавливают марок: 75, 100, 125, 150, 175, 200, 300. Марка по прочности лицевого кирпича должна быть не менее 125, лицевых камней — 100. По *морозостойкости* кирпич и камни изготавливают марок: *F* 15, *F* 25, *F* 35, *F* 50. Марка по морозостойкости лицевых изделий должна быть не менее *F* 25. *Водопоглощение* изделий должно быть не менее 6 %.

Силикатный кирпич и камни применяют для кладки каменных и армокаменных стен и других конструкций в надземной части зданий с нормальным и влажным режимами эксплуатации. Вследствие ограниченной водостойкости силикатный кирпич и камни нельзя использовать для фундаментов и цоколей зданий ниже гидроизоляционного слоя. Эти изделия нельзя также применять для кладки печей и дымовых труб, они не выдерживают длительного воздействия высокой температуры.

**Силикатный бетон** представляет собой бесцементный (на известково-песчаном вяжущем) бетон автоклавного твердения. *Плотные* силикатные бетоны можно получить на обычных заполнителях (мелком — песке и крупном — щебне) путем уплотнения (обычно вибрированием) сырьевой смеси в формах. Более эффективным и востребованным видом силикатного бетона является ячеистый силикатный бетон (газосиликат), который отличается от плотного бетона значительно меньшей теплопроводностью, материалоемкостью и энергоемкостью. Из *газосиликата* изготавливают стеновые камни, плитную теплоизоляцию, а также армированные крупно-размерные изделия (перемычки, панели и плиты перекрытий и др.) с обязательной защитой арматуры от коррозии вследствие пониженной щелочности жидкой фазы в таких бетонах и их высокой пористости. На фасадную поверхность изделий из газосиликата обязательно наносят защитно-декоративные покрытия.

## 9. МЕТАЛЛЫ И ИЗДЕЛИЯ ИЗ НИХ

### 9.1. Общие сведения

*Металлами называют вещества, характерными признаками которых при обычных условиях являются высокая прочность, пластичность, тепло- и электропроводность, особый блеск, называемый металлическим. Такие свойства металлов обуславливаются их электронными межатомными связями и кристаллическим строением.*

**Классификация металлов.** Металлы разделяют на две основные группы: черные и цветные. *Черные металлы* – это железоуглеродистые сплавы с примесями кремния, фосфора, марганца и др.; в зависимости от содержания в них углерода подразделяются на стали (содержание углерода менее 2 %) и чугуны (содержание углерода более 2 %). На их долю приходится около 95 % производимых в мире металлов. Остальные металлы и сплавы на их основе относятся к *цветным*, которые делятся на легкие, плотностью до 5 г/см<sup>3</sup> (алюминий, цинк, магний и сплавы на их основе), и тяжелые, плотностью свыше 5 г/см<sup>3</sup> (медь и сплавы на ее основе).

*Сталь* – основной конструкционный металл, применяемый в строительстве. Стали делят на углеродистые и легированные. *Углеродистые стали* содержат железо, углерод и примеси марганца, кремния, фосфора, серы в концентрациях, называемых нормальными (0,8-1 %). С повышением содержания углерода в углеродистых сталях повышаются их прочность и твердость, но понижается пластичность и увеличивается хрупкость, а также ухудшается свариваемость. *По содержанию углерода* различают: а) низкоуглеродистые стали (содержание углерода до 0,25 %); б) среднеуглеродистые стали (содержание углерода от 0,25 до 0,6 %); в) высокоуглеродистые стали (содержание углерода 0,6-2 %). *По назначению* углеродистые стали разделяют на виды: а) стали обыкновенного качества; б) качественные конструкционные; в) инструментальные.

*Легированные стали* кроме указанных выше примесей содержат легирующие добавки никеля, хрома, титана, марганца, ванадия и др. К легирующим добавкам относятся марганец и кремний, если их содержание превышает нормальные концентрации. Легирующие добавки в целом повышают как прочность сталей, так и их пластичность, и коррозионную стойкость. *По содержанию легирующих добавок* различают: а) низколегированные стали (содержание легирующих добавок в сумме не более 2,5 %); б) среднелегированные (содержание легирующих добавок от 2,5 до 10 %); в) высоколегированные (содержание легирующих добавок свыше 10 %). *По назначению* легированные стали разделяют на виды: а) конструкционные; б) инструментальные; в) специального назначения.

*Чугуны* могут содержать от 2 до 6,67 % углерода. Чугуны являются, как промежуточным продуктом при производстве стали (*передельные* или

*белые* чугуны с содержанием углерода вплоть до предельного значения в железоуглеродистом сплаве – 6,67 %, а также ферросплавы), так и конструкционным материалом (*литейные* или *серые* чугуны с содержанием углерода от 2 до 4 %). Чугуны отличаются высокой твердостью, износостойкостью и хрупкостью, а также меньшими, чем сталь, температурными деформациями. Из серых чугунов изготавливают элементы строительных конструкций, в том числе и такие ответственные, как опорные части железобетонных балок, ферм, башмаки под колонны и др., а также декоративные изделия – чугунное литье и детали печей – печное литье.

*Цветные металлы* в чистом виде очень редко используются в строительстве. Наиболее распространенными *легкими* сплавами являются сплавы на основе алюминия – алюминий-магниево-магний (магналии), алюминий с медью и магнием (дюралюминий), алюминий с магнием и кремнием (авиаль). Их используют для изготовления несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений. *Тяжелые* сплавы получают на основе меди, олова, цинка, свинца. Среди них наиболее распространены в строительстве *бронзы* – сплав меди с оловом (оловянистая бронза) или сплав меди с алюминием, железом и марганцем (алюминиевая бронза), а также *латунь* – сплав меди с цинком. Эти сплавы отличаются высокой прочностью при достаточной легкости и высокой стойкости к коррозии. Их используют для изготовления архитектурных деталей и санитарно-технической продукции.

**Кристаллическое строение металлов.** Металлы представляют собой сложные многофазовые системы, имеющие в твердом состоянии кристаллическое строение. Каждый металл имеет свою характерную кристаллическую ячейку, которая многократно повторяется и образует кристаллическую решетку. Между структурными элементами металлов действуют различные связи: металлическая, ван-дер-ваальсовая, ионная и ковалентная. В сталях преобладает металлическая связь между решеткой из положительно заряженных ионов и окружающим их «газом» из свободных электронов.

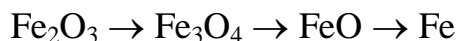
Пространственные кристаллические решетки образуются в металле при его переходе из жидкого состояния в твердое. Этот процесс называется *кристаллизацией*. Вначале образуются первичные группы кристаллов – центры кристаллизации. Затем происходит рост кристаллов вокруг этих центров. Образовавшиеся зерна металла за счет сближения друг с другом при росте кристаллов имеют неправильную форму, но сохраняют правильность строения внутри каждого кристалла. Образование границ между зернами является важнейшей причиной появления поверхностных дефектов – *дислокаций*, которые значительно снижают прочность реального металла по сравнению с идеальным (бездефектным) кристаллом. Вместе с тем при увеличении количества дислокаций (плотности дислокаций) сверх некоторого минимального значения в результате измельчения зерен при термообработке металлов, механическом наклепе и других способах упрочнения достигается повышение реальной прочности за счет того, что на-



ходящиеся в разных плоскостях и направлениях дислокации мешают друг другу расти и перемещаться.

Технические металлы представляют собой поликристаллические тела, состоящие из большого числа различно ориентированных зерен размером 0,001-0,1 мм. Поэтому в целом металлы являются условно изотропными телами, т.е. обладающими примерно одинаковыми свойствами по всем направлениям.

**Производство чугуна и стали.** Чугун выплавляют в доменных печах из железных руд (красного железняка, магнитного железняка и др.). Основным видом топлива является кокс. Для снижения температуры плавления пустой породы, в состав которой входят кремнезем, алюмосиликаты, а также вредные примеси (сера, фосфор), в печь при загрузке руды и топлива добавляют в зависимости от состава руды основные плавни, или флюсы (известняк, доломит), или кислые флюсы (кварц, кварцит, песчаник). Чугун при доменном процессе получается в результате восстановления железа из руд по схеме



Жидкий металл скапливается внизу, более легкий шлак всплывает на поверхность чугуна и защищает его от окисления. После выплавки чугуна сначала выпускают шлак, а затем через нижнее отверстие – чугун. В результате получают науглероженное железо (чугун) с примесями кварца, фосфора, серы, марганца.

*Сталь* выплавляют в мартеновских печах, конверторах, электропечах. Выплавка стали заключается в уменьшении содержания углерода и примесей в металле путем окисления их кислородом воздуха или кислородом, содержащимся в железной руде, до таких соединений, которые могут быть переведены в шлак или удалены в газообразном состоянии. За счет высокой температуры и поступления кислорода в печь происходят процессы окисления углерода и примесей и их перевод в шлак, а также окисления железа до закиси FeO. Чтобы избавиться от последней, немедленно проводят процесс раскисления:  $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ . Для этого в расплав вводят раскислители (ферросплавы, алюминий), энергично соединяющиеся с кислородом закиси железа. В зависимости от полноты раскисления различают: *спокойную* сталь, получающуюся при полном раскислении и застывании металла без выделения газа; *полуспокойную* и *кипящую* стали, получающиеся при неполном раскислении. В кипящей стали часть газов остается в металле и при его охлаждении образует газовые пузыри. Полуспокойная сталь занимает промежуточное положение между спокойной и кипящей сталями.

**Состав и строение железоуглеродистых сплавов.** В результате совместной кристаллизации могут образовываться сплавы следующих типов: механическая смесь, твердый раствор и химическое соединение. *Механическая смесь* образуется путем срастания кристаллов между собой при сохранении специфических свойств каждого компонента. *Твердый раствор*

образуется в результате проникновения в кристаллическую решетку основного металла атомов другого металла или неметалла. В зависимости от характера размещения атомов различают твердые растворы замещения, когда атомы одного компонента частично замещают атомы другого компонента в узлах его кристаллической решетки (при совместной кристаллизации металлов), и внедрения, когда атомы одного из компонентов размещаются в междоузлиях кристаллической решетки другого (при совместной кристаллизации металла с неметаллом). *Химическое соединение* образуется в результате химического взаимодействия в строгом порядке и количественном соотношении. Основное химическое соединение в сплавах железа с углеродом – карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ , называемый *цементитом*.

Строение сплава определяет его свойства, поэтому важно знать, как это строение меняется в зависимости от состава сплава, а также температуры получения. Основными структурными элементами железоуглеродистого сплава при изменении содержания в нем углерода (рис.8) являются: *феррит* – твердый раствор углерода в  $\alpha\text{-Fe}$ , по свойствам близкий к чистому железу, такой же мягкий и пластичный; *цементит* – карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ , химическое соединение, очень твердый; *перлит* – механическая смесь феррита и цементита; *ледебурит* – механическая смесь аустенита (твердого раствора углерода в  $\gamma\text{-Fe}$ ) и цементита, очень тверд, хрупок.

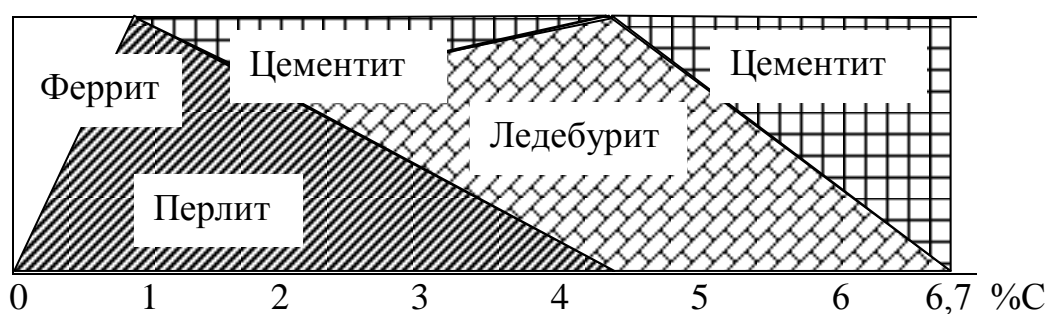


Рис. 8. Основные структурные элементы железоуглеродистого сплава

С увеличением содержания углерода в железоуглеродистом сплаве меняется его структура, увеличивается содержание цементита и уменьшается количество перлита. При этом твердость и прочность сплава становятся выше, его пластические свойства – ниже.

**Механические свойства металлов** – это предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, твердость, ударная вязкость. При испытании на растяжение строят диаграмму растяжения, на которой для одних металлов, например низко- и среднеуглеродистых сталей, фиксируется площадка текучести, указывающая на способность металла претерпевать значительные пластические деформации; на диаграмме растяжения других металлов, например высокоуглеродистых сталей, такая площадка отсутствует.

*Предел текучести*  $\sigma_T$  (МПа) определяют либо как напряжение, соответствующее нижнему пределу площадки текучести, либо – для металлов, не имеющих площадки текучести, – как напряжение, при котором достигается некоторая остаточная деформация (обычно 0,2 %, если ее величина не оговорена особо):

$$\sigma_T = p_T / A_0,$$

где  $p_T$  – соответствующая нагрузка, Н;  $A_0$  – площадь первоначального сечения шейки образца, мм<sup>2</sup>.

*Временное сопротивление*  $\sigma_B$  (МПа) определяют как предел прочности металла на растяжение:

$$\sigma_B = p_B / A_0,$$

где  $p_B$  – нагрузка, соответствующая разрыву образца, Н.

*Относительное удлинение*  $\Delta l$  (%) характеризует пластичность металла и определяется как отношение приращения длины образца к его исходной длине:

$$\Delta l = (l_1 - l_0) \cdot 100 / l_0,$$

где  $l_1$  – максимальная длина образца (в момент разрыва), мм;  $l_0$  – первоначальная длина образца, мм.

Для чугунов определяют пределы прочности при растяжении, сжатии, изгибе, а также твердость.

## 9.2. Основные виды и марки сталей, применяемых в строительстве

В строительстве в основном применяют углеродистые стали обыкновенного качества, качественные конструкционные углеродистые стали и низколегированные конструкционные стали.

*Углеродистые стали обыкновенного качества* содержат углерод в количестве 0,06 – 0,62 %, а также примеси кремния и марганца в нормальных концентрациях. При обозначении марок стали могут быть указаны: группы поставки (А – по механическим свойствам, Б – химическому составу, В – механическим свойствам с дополнительными требованиями по химическому составу); метод производства (М – мартеновский, Б – бессемеровский, К – кислородно-конверторный); дополнительные индексы (сп – спокойная сталь, пс – полуспокойная сталь, кп – кипящая сталь). В группе А обозначение способа производства часто опускается, однако имеется в виду сталь мартеновская, а при отсутствии дополнительного индекса подразумевается сталь спокойная.

Углеродистую сталь обыкновенного качества *группы А* изготавливают марок: Ст 0, Ст 1, Ст 2, Ст 3, Ст 4, Ст 5, Ст 6, Ст 7; сталь *группы Б* – тех же марок, что и сталь группы А, но перед маркой стали ставят букву Б (например, Б Ст 0, Б Ст 1 кп); сталь *группы В* – В Ст 2, В Ст 3, В Ст 4 и

В Ст 5. По мере увеличения номера повышаются содержание углерода в стали, ее прочность и твердость, но снижаются пластичность и ударная вязкость.

*Качественная конструкционная углеродистая сталь* поставляется по химическому составу и механическим свойствам и выплавляется в мартенах и кислородных конверторах. Установлены марки этой стали: 05 кп, 08 кп, 08 пс, 10 кп, 10 пс, 15 кп, 15 пс, 15, 20 кп, 20 пс, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58, 60. Две цифры в марках показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента.

В маркировке *легированной стали* указывают названия легирующих добавок и их содержание. Приняты буквенные обозначения легирующих элементов: С – кремний (при концентрации выше нормальной), Г – марганец (концентрации выше нормальной), Х – хром, Н – никель, М – молибден, В – вольфрам, Т – титан и др. Первые две цифры марки указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Одна цифра в начале марки обозначает среднее содержание углерода в десятых долях процента. Если в начале марки нет цифры, то количество углерода составляет 1 % и выше. Цифры, следующие за буквами, показывают среднее содержание данного элемента в процентах; если за буквой отсутствует цифра, то содержание данного элемента около 1 %. Буква А в конце марки обозначает высококачественную сталь, содержащую меньше серы и фосфора. Например, 35 Х Н 3 М А – это легированная сталь, высококачественная, с содержанием углерода 0,35 %, хрома и молибдена – около 1 %, никеля – 3 %; Г 13 – это легированная сталь с содержанием углерода 1 % и выше, марганца – 13 %.

Низкоуглеродистые и низколегированные стали широко применяют для изготовления металлических конструкций мостов, опор, транспортных галерей, элементов каркаса зданий и сооружений, армирования железобетонных конструкций и др. Элементы металлических конструкций получают в горячем или холодном состоянии различными способами: прокатом, ковкой, волочением, штамповкой, прессованием (металлических порошков). После этого часто производят термическую или механическую обработку стали с целью ее упрочнения.

К *термической обработке стали* относят: а) закалку, б) отпуск, в) отжиг, г) нормализацию, д) обработку холодом, е) химико-термическую обработку (цементацию, азотирование, хромирование). Для низкоуглеродистых сталей термическая обработка повышает предел прочности на 20-25 %, что снижает расход стали на 13-18 %. Экономическую эффективность металлических конструкций повышают, применяя высокопрочные стали (600-1000 МПа). Для этого их легируют карбидообразующими элементами (например, хромом, молибденом, вольфрамом, ниобием).

Соединение элементов в конструкцию производят с помощью сварки, клепки, болтов. *Сваркой* называют процесс получения неразъемных соеди-

нений металлических изделий с применением местного нагрева. По виду энергии различают сварку химическую (газовую, термитную) и электрическую (дуговую, контактную); по состоянию металла в зоне сварки – пластическую (нагрев металла до пластического состояния) и сварку плавлением; по способу подачи металла и осуществления сварки – ручную, полуавтоматическую и автоматическую. В строительстве наиболее распространены электродуговая сварка плавлением и электроконтактная сварка в пластическом состоянии (стыковая, точечная, шовная или роликовая). Газовая сварка применяется для соединения элементов из чугуна, цветных металлов, строительных деталей малой толщины.

### 9.3. Основные виды металлических изделий для строительства

В строительстве применяют основные виды металлоизделий:

- *сортамент прокатного металла и металлических изделий*:
  - а) сортовая сталь (круглая, квадратная, полосовая); б) листовая сталь (в том числе кровельная – черная и оцинкованная); в) профильная (уголковые профили, швеллеры, тавры, двутавры, рельсы, трубы и другие фасонные профили);
  - *штампованные и гнутые профили* (экономичнее горячекатаных изделий);
  - *поковки* (болты, скобы, анкеры);
  - *проволока, прутки* (получаемые прокатом или волочением);
  - *арматурные изделия* (стержневая и проволочная арматура, закладные детали).

*Стержневая арматура* бывает: а) горячекатаная – гладкая класса А240 (прежнее обозначение А-I), периодического профиля классов А300 (А-II)... А1000 (А-VI); цифра в обозначении класса указывает предел текучести арматурной стали в мегапаскалях; б) термически и термомеханически упрочненная – периодического профиля классов Ат400 (Ат-III)... Ат1200 (Ат-VII).

*Проволочная арматура* бывает: а) холодноотянутая проволока – обыкновенная (гладкая класса В-I и периодического профиля класса Вр-I), высокопрочная (гладкая класса В-II и периодического профиля класса Вр-II); б) арматурные канаты – спиральные семипроволочные класса К-7 и девятнадцатипроволочные класса К-19.

Для закладных деталей и соединительных накладок принимается, как правило, прокатная углеродистая сталь соответствующих марок.

### 9.4. Защита металлов от коррозии

Различают химическую и электрохимическую коррозию металлов. Химическая коррозия происходит в результате окислительного или восстановительного процессов, протекающих под действием внешней среды (газообразной или жидких неэлектролитов – нефти, бензина, керосина).

*Электрохимическая* коррозия – наиболее распространенный вид коррозии металлов. Она происходит при взаимодействии металлов с ионами электролитов и заключается в переносе ионов из одного слоя металла в другой, а также в газообразную или водную среду. При контакте разнородных металлов разрушается более электроотрицательный металл. Например, при контакте цинка с железом разрушается цинк. Металл, находящийся под нагрузкой, подвергается коррозии значительно быстрее ненагруженного, так как в нем нарушается целостность защитной пленки и образуются микротрещины.

Для защиты металла от коррозии применяют *легирование* (введением легирующих добавок до 20 % получают нержавеющие стали) и *защитные покрытия*. В качестве последних используют: а) металлические пленки, представляющие собой механическую (пассивную) защиту, т.е. катодное покрытие – покрытие металлом, более электроположительным, чем основной, или электрохимическую (активную) защиту, т.е. анодное покрытие – покрытие металлом, более электроотрицательным, чем основной; б) оксидные пленки, получаемые путем оксидирования (воронения); в) лакокрасочные покрытия. Ванны, раковины, декоративные изделия для защиты от коррозии покрывают эмалью, т.е. наплавляют на металл при 750-800 °С различные комбинации силикатов (кварц, полевой шпат, буру, глину и др.).

## 10. МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ

### 10.1. Общие сведения

*Древесиной называют освобожденную от коры часть ствола дерева, имеющую слоисто-волокнутое строение.* Древесина обладает рядом ценных свойств: небольшой плотностью, высокой прочностью, малой теплопроводностью, гибкостью и упругостью, высоким коэффициентом конструктивного качества. Однако при использовании древесины в строительстве необходимо учитывать такие недостатки этого материала, зависящие от его строения и состава, как неоднородность свойств по объему и направлению (анизотропию), гигроскопичность, которая приводит к изменению размеров, короблению и растрескиванию, загнивание во влажных условиях и сгораемость.

**Строение древесины.** На торцевом срезе ствола дерева видна кора, камбий и древесина. *Кора* состоит из наружной кожицы, пробкового слоя под ней и внутреннего слоя – *луба*, который проводит питательные вещества по стволу дерева. *Камбий*, расположенный под лубом, представляет собой тонкий слой живых клеток, способных к делению и росту. *Древесина* является основной частью ствола и находится под камбиальным слоем. Древесина состоит из *годовых слоев*. Каждый годичный слой представлен ранней и поздней древесиной. *Ранняя* древесина образуется весной и в на-

чале лета, *поздняя* – летом и в начале осени. Поздняя древесина является более плотной и прочной, чем ранняя.

В древесине на торцевом срезе можно выделить сердцевину, ядро и заболонь. *Серцевина* – рыхлая первичная ткань, которая имеет малую прочность и легко загнивает. *Ядро*, или спелая древесина – внутренняя часть ствола дерева, состоящая из омертвевших клеток. Ядро выделяется темным цветом и обладает большей прочностью и стойкостью к загниванию по сравнению с древесиной заболони. *Заболонь* состоит из живых клеток, имеет большую влажность, легко загнивает, вследствие большой усушки усиливает коробление пиломатериалов.

Древесные породы делят: 1) на ядровые, имеющие ядро и заболонь (дуб, ясень, сосна, лиственница, кедр и др.); 2) спелодревесные, имеющие спелую древесину (она не отличается по цвету от заболони) и заболонь (ель, пихта, осина, бук и др.); 3) заболонные, у которых отсутствует ядро (береза, клен, ольха, липа).

*Микроструктура* древесины включает разного рода клетки. Оболочка (стенка) клетки состоит на 99 % из органических соединений, главнейшими из которых являются целлюлоза и лигнин. *Лигнин* – природный полимер, соединяющий в единое целое *целлюлозные* волокна. Древесина содержит капилляры и поры различных размеров. В древесине содержится влага различных типов: химически связанная, связанная молекулярными силами или гигроскопическая, капиллярная и свободная. *Крупные* поры и *капилляры* заполняются водой при непосредственном контакте древесины с водой. *Тонкие поры и капилляры* заполняются влагой из воздуха при гигроскопическом увлажнении.

**Основные хвойные породы древесины.** *Сосна* – ядровая порода, у которой ядро буро-красного цвета, а заболонь – желтого. Древесина сосны легкая (средняя плотность 470-540 кг/м<sup>3</sup>), легко обрабатывается, при этом достаточно прочная.

*Ель* по качеству древесины уступает сосне, имеет спелую древесину бело-желтого цвета, менее смолистую и более легкую (плотность 440-500 кг/м<sup>3</sup>) с большим количеством сучков.

*Лиственница* имеет ядро красновато-бурого цвета; ее древесина плотная (плотность 630-790 кг/м<sup>3</sup>), твердая, прочная, менее подвержена гниению, чем у сосны. Применяется в гидротехническом строительстве, для строительства мостов, из неё изготавливают шпалы.

*Кедр* имеет мягкую легкую древесину, имеющую более низкие механические свойства, чем у сосны. Из нее изготавливают пиломатериалы, столярные изделия, декоративную фанеру для отделки мебели.

*Пихта* по древесине схожа с елью, но не имеет смоляных ходов, легко загнивает, поэтому ее не применяют во влажных условиях эксплуатации.

**Основные лиственные породы древесины.** *Дуб* имеет плотную (около 720 кг/м<sup>3</sup>), очень прочную и твердую древесину. Ядро у дуба темно-

бурое, заболонь желтая, на разрезе древесины имеются крупные сердцевинные лучи. Дуб применяют в ответственных конструкциях гидротехнических сооружений, мостостроении, для изготовления паркета, мебели.

*Ясень* имеет тяжелую, гибкую и вязкую древесину, но менее прочную, чем у дуба. Благодаря красивой текстуре ценится в мебельном производстве и столярно-отделочных работах.

*Береза* – распространенная заболонная порода, имеет тяжелую (около 650 кг/м<sup>3</sup>) древесину, которая легко загнивает во влажных условиях. Используют для изготовления фанеры, столярных и отделочных материалов (в том числе для имитации ценных пород древесины).

*Бук* – спелодревесная порода, имеющая тяжелую и твердую древесину, которая легко раскалывается и относительно легко загнивает. Применяют для производства паркета, мебели, фанеры.

*Граб* имеет древесину, схожую с буковой, но более тяжелую. Используют для тех же целей, что и бук.

*Осина* – заболонная порода с мягкой и легкой древесиной (420-500 кг/м<sup>3</sup>), склонной к загниванию. Служит сырьем для производства фанеры, древесных плит.

*Ольха* – заболонная порода с мягкой древесиной, склонной к загниванию. Как и березу, используют для изготовления фанеры.

*Липа* – спелодревесная мягкая порода. Используют для изготовления фанеры, мебели, тары.

## 10.2. Свойства древесины

Свойства древесины подразделяются на физические и механические. Важное значение имеют также наличие в древесине тех или иных пороков и ее стойкость к загниванию.

**Физические свойства древесины.** К основным физическим свойствам древесины относят влажность, усушку, набухание, истинную и среднюю плотность, пористость, теплопроводность и др.

Древесина, имея волокнистое строение и высокую пористость (55 – 65 %), обладает большой внутренней поверхностью, которая легко адсорбирует влагу из воздуха. При изменении температурно-влажностных условий эксплуатации древесина легко впитывает и отдает влагу, что сказывается на ее влажности. Влажность, соответствующая предельному содержанию связанной молекулярными силами влаги при ее отсутствии в свободном состоянии, называется *пределом гигроскопичности древесины или точкой насыщения волокон*. Предел гигроскопичности древесины в среднем равен 30 %. Влажность влияет на все физические и механические свойства древесины (увеличение влажности приводит, например, к повышению электропроводности, увеличению размеров, снижению прочности). В зависимости от влажности древесину подразделяют: на *мокрую*, длительное время находившуюся в воде, влажностью свыше 100 %; *свеже-*



*срубленную*, влажностью 50 – 100 %, *воздушно-сухую*, долгое время хранившуюся на воздухе, влажностью 15 – 20 %; *комнатно-сухую*, влажностью 8 – 12 % и *абсолютно сухую*, влажностью около 0 %. Влажность древесины, длительно находящейся при постоянном температурно-влажностном режиме, называют *равновесной*. Для получения сравнимых данных о физико-механических показателях древесины, зависящих от влажности, используется понятие *стандартная влажность* древесины, значение которой установлено равным 12 %.

*Усушка и набухание* древесины происходят при изменении ее влажности. Различают линейную и объемную усушку. Линейную усушку поперек волокон определяют в двух направлениях – тангенциальном и радиальном. Усушка в радиальном направлении составляет 3-6 %, в тангенциальном – в 1,5-2 раза больше, чем в радиальном. Усушку вдоль волокон ввиду ее незначительной величины не определяют. Объемная усушка составляет в среднем 12-15 %. Усушка и набухание происходят в пределах гигроскопичности (0-30 %), при этом изменяются (ухудшаются) и физико-механические свойства древесины. Увеличение влажности сверх 30 % на свойствах древесины почти не отражается; не увеличивается и ее объем за счет набухания.

*Истинная плотность* древесного вещества всех пород примерно одинакова и составляет 1,54 г/см<sup>3</sup>. *Средняя плотность* изменяется от 380 кг/м<sup>3</sup> (сибирская пихта) до 1110 кг/м<sup>3</sup> (ядро фисташки). Для пересчета плотности древесины с влажностью до 30 % на плотность при стандартной влажности используют формулу

$$\rho_m^{12} = \rho_m^W \cdot [1 + 0.01 \cdot (1 - k_0) \cdot (12 - W)],$$

где  $\rho_m^{12}$  – средняя плотность древесины при стандартной влажности, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_m^W$  – средняя плотность древесины при данной влажности, г/см<sup>3</sup>;  $k_0$  – коэффициент объемной усушки, %;  $W$  – влажность образца, %.

Если коэффициент объемной усушки  $k_0$  не определялся, то при пересчете плотности на стандартную влажность для древесины березы, бука и лиственницы значение его берут равным 0,6, а для прочих пород – 0,5.

*Теплопроводность* древесины вследствие ее высокой пористости в целом невелика, при этом вдоль волокон теплопроводность значительно больше, чем поперек. Например, теплопроводность сосны вдоль волокон равна 0,35 Вт/(м · °С), а поперек волокон – 0,17 Вт/(м · °С).

Древесина – горючий материал с температурой воспламенения 238-255 °С.

**Механические свойства древесины.** Механические свойства древесины характеризуются пределами прочности при сжатии (вдоль и поперек волокон), растяжении, статическом изгибе и скалывании, модулями упругости. При испытании на прочность образцы, как правило, должны иметь

нормализованную влажность (равновесную влажность в среде с температурой  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  и относительной влажностью воздуха  $(65 \pm 2)\%$ ). Для этого перед испытанием образцы кондиционируют при указанных параметрах среды до приобретения древесиной нормализованной влажности. В то же время действующим стандартом допускается проводить испытания на образцах, не подвергавшихся кондиционированию, с влажностью, отличающейся от нормализованной.

Предел прочности при сжатии вдоль волокон кондиционированных образцов пересчитывают на стандартную влажность 12 % с погрешностью до 0,5 МПа по формулам:

– для образцов с влажностью меньше предела гигроскопичности (30 %)

$$R_{\text{сж}}^{12} = R_{\text{сж}}^W \cdot [1 + a \cdot (W - 12)],$$

где  $R_{\text{сж}}^{12}$  – предел прочности при сжатии образца при стандартной влажности, МПа;  $R_{\text{сж}}^W$  – предел прочности при сжатии образца с влажностью  $W$  в момент испытания, МПа;  $a$  – поправочный коэффициент, равный 0,04;  $W$  – влажность образца в момент испытания, %;

– для образцов с влажностью, равной или больше предела гигроскопичности,

$$R_{\text{сж}}^{12} = \frac{R_{\text{сж}}^W}{K_{12}^{30}},$$

где  $K_{12}^{30}$  – коэффициент пересчета при влажности 30 %, равный 0,550 – для дуба, липы, ольхи; 0,450 – бука, сосны; 0,445 – ели, осины, пихты, тополя; 0,400 – березы и лиственницы.

*Предел прочности древесины на сжатие поперек волокон* в 4-6 раз меньше предела прочности при сжатии вдоль волокон.

*Предел прочности древесины при статическом изгибе* при данной влажности  $R_{\text{и}}^W$  (в МПа) определяют на образцах в форме прямоугольной призмы с поперечным сечением  $20 \times 20$  мм и длиной вдоль волокон 300 мм по формуле

$$R_{\text{и}}^W = 3 \cdot P_{\text{max}} \cdot l / (2 \cdot b \cdot h^2),$$

где  $P_{\text{max}}$  – максимальная разрушающая нагрузка, приложенная по центру образца, Н;  $l$  – расстояние между опорами, мм;  $b$  и  $h$  – ширина и высота образца, мм.

Пересчет предела прочности древесины при статическом изгибе на стандартную влажность производится так же, как для предела прочности при сжатии.

*Предел прочности древесины при скалывании вдоль волокон* невелик и составляет примерно 12-25 % от предела прочности при сжатии вдоль волокон.

*Модули упругости при сжатии вдоль волокон и статическом изгибе* примерно одинаковы; у воздушно-сухих сосны и ели находятся в пределах 10000-15000 МПа. Их значение возрастает с увеличением плотности, а увлажнение величину модулей упругости снижает.

**Пороки древесины.** Пороки древесины подразделяют на группы: сучки, трещины, пороки формы ствола, пороки строения древесины, химические окраски, грибные поражения и прочие пороки.

*Сучки* – части ветвей, заключенные в древесине. Они нарушают однородность строения древесины, вызывают искривление волокон и затрудняют механическую обработку.

*Трещины* (метиковые, морозные, отлупные) – разрывы древесины вдоль волокон. Нарушают целостность материала, снижают механическую прочность и долговечность.

*Пороки формы ствола.* Различают: *сбежистость* – уменьшение диаметра круглых лесоматериалов от толстого к тонкому концу, превышающее нормальный сбег (равный 1 см на 1 м длины бревна); увеличивает расход древесины при распиловке, снижает прочность материалов; *закомелистость* – резкое увеличение комлевой (нижней) части ствола; *кривизну*, которая затрудняет механическую обработку древесины, снижает ее прочность при растяжении и изгибе.

*Пороки строения древесины.* Различают: *наклон волокон (косослой)* – непараллельность волокон древесины оси древесного материала, снижающую ее прочность при растяжении и изгибе; *крень* – ненормальное утолщение поздней древесины в годовых слоях; *свилеватость* – волокнистое или беспорядочное расположение волокон древесины, чаще в комлевой части ствола; *завиток* – резкое местное искривление годовых слоев под влиянием сучков и проростей; *сердцевину* – узкую центральную часть ствола, состоящую из рыхлой древесной ткани, которая, попадая в изделия, усиливает их растрескивание.

К *химическим окраскам* относятся желтизна, оранжевая окраска, чернильные пятна, дубильные потеки. Все они проникают на глубину 1-5 мм и мало влияют на физико-механические свойства древесины, ухудшая в основном только внешний вид пиломатериалов.

*Грибные поражения (гнили)*, образующиеся в растущем дереве под действием дереворазрушающих грибов, существенно снижают механические свойства и сортность древесины. Гнили отмершей древесины являются одними из самых опасных пороков. Они образуются под действием домовых грибов. Древесина становится не только непригодной к применению, но и опасной для окружающих материалов.

Такие пороки, как *грибные окраски*, развивающиеся в отмершей древесине, мало изменяют ее прочность, но ухудшают внешний вид.

К прочим порокам древесины относятся повреждения насекомыми (червоточины), инородные включения и дефекты, деформации (покоробленность – искривление пиломатериала, возникающее при распиловке, сушке и хранении).

**Защита древесины от гниения и возгорания.** Основным приемом защиты древесины от гниения и повышения ее прочности является *сушка*. Различают естественную и искусственную сушку. *Естественная* сушка происходит на складах – площадках на возвышенности с оборудованными водостоками, защитой от атмосферных осадков в виде навесов. Для предотвращения быстрого высыхания и растрескивания торцы досок промазывают жидким составом из извести, клея, поваренной соли. Доски складывают в штабеля, верхний слой размещают под наклоном и покрывают гидроизоляционным материалом. Естественная сушка не требует специального оборудования, но осуществляется медленно, зависит от погоды и занимает от 2-3 месяцев до 1-1,5 лет. Воздушно-сухую древесину получают с минимальной влажностью 15 %. *Искусственная* сушка происходит значительно быстрее и позволяет высушить древесину до влажности 6-10 %. Искусственную сушку часто производят в *камерных сушилках* периодического действия, теплоносителем в которых является нагретый воздух, пар или дымовые газы с температурой 70 – 80 °С; в них можно создать мягкий режим сушки и избежать растрескивание древесины; продолжительность сушки сосновых и еловых досок толщиной 50 мм составляет 3-6 суток. Кроме того, применяют *контактную сушку*, когда тонкую древесину (шпон, фанеру) сушат между периодически смыкающимися горячими плитами пресса; *скоростную сушку в горячих жидких средах*, когда древесину в виде пакета погружают в ванну с нагретым до температуры 130 – 140 °С раствором петролатума на 8-12 часов (при этом древесина не растрескивается и не коробится; одновременно производится ее антисептирование); *сушку токами высокой частоты*, когда древесину помещают между сетчатыми электродами, к которым подведен ток высокой частоты (этот вид сушки требует большого расхода энергии и применяется только для высококачественных древесных материалов).

Для *химической* защиты древесины от гниения и поражения насекомыми применяют специальные вещества – *антисептики*. Они делятся на водорастворимые и нерастворимые в воде (маслянистые). К *водорастворимым* антисептикам относятся: фтористый натрий NaF (применяется в растворах 2-3 % концентрации); кремнефтористый натрий Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> (применяется совместно с фтористым натрием, а также в составе антисептических паст); препараты ХХЦ (смесь хлорида цинка и натриевого или калиевого хромпика) и МХХЦ (смесь хлорида цинка, хромпика и медного купороса); органорастворимые препараты типа ПЛ (растворы пентахлорфенола в лег-

ких нефтепродуктах); высокотоксичные антисептики в виде жидкостей и паст, содержащие арсенаты металлов. *Маслянистые* антисептики – антраценовое, сланцевое, креозотовое масла – обладают сильным антисептическим действием, не вызывают коррозию металла, но окрашивают древесину в темный цвет, имеют резкий фенольный запах. Применяются для обработки шпал, деталей мостов, свай, наземных деревянных конструкций.

Пропитку антисептиками производят поверхностной обработкой, в горяче-холодных ваннах и под давлением в автоклавах.

Для защиты древесины от *возгорания* предусматривают: соответствующие *конструктивные* меры (устройство разделок из негорючих материалов, защитных покрытий – штукатурных и др.); окрашивание поверхности древесины *огнезащитными красочными составами* (композициями из связующего вещества – обычно жидкого стекла, наполнителя – кварцевого песка, мела, магнезита и щелочестойкого пигмента (охры, мумии и т.п.); пропитку *огнезащитными веществами – антипиренами* (бура, сульфат аммония, фосфорно-кислый натрий и аммоний), которые при пожаре либо образуют оплавленную пленку на поверхности древесины, затрудняющую доступ кислорода, либо выделяют негорючие газы, снижающие концентрацию кислорода в газовой среде возле конструкции.

### 10.3. Лесоматериалы и изделия из древесины

**Лесоматериалы** получают механической обработкой древесины. Они подразделяются на круглые лесоматериалы, пиломатериалы, фрезерованные и строганные материалы, вторичные продукты: опилки, стружки, щепа, древесная мука.

*Круглые* лесоматериалы – стволы поваленного дерева, очищенные от сучьев. В зависимости от диаметра ствола в верхнем отрубе различают: бревна (диаметр более 12 см), подтоварник (диаметр 8 – 11 см) и жерди (диаметр 3 – 7 см). Бревна делят на *строительные* (из сосны, лиственницы, кедра, реже ели и дуба), предназначенные для несущих конструкций, и *пиловочные*, используемые для получения пиломатериалов.

*Пиломатериалы* получают продольной распиловкой пиловочных бревен. Они подразделяются на доски (толщиной 100 мм и менее), бруски (имеющие толщину менее 100 мм, но ширину меньше трехкратной толщины), брусья (имеющие ширину и толщину более 100 мм).

*Строганные и шпунтованные* доски и бруски имеют на одной кромке шпунт, а на другой – гребень для плотного соединения элементов. *Фрезерованные* изделия – плинтус, поручни, наличники и т.п.

**Изделия из древесины.** К ним относятся паркет, мебельные щиты, столярные изделия – оконные и дверные блоки, двери и т.п., фанера, древесно-стружечные и древесно-волокнистые плиты, древесно-слоистые пластики, а также сборные дома, клееные деревянные конструкции и изделия

из модифицированной древесины (обработанной синтетическими смолами, прессованной, пластифицированной аммиаком и др.).

## 11. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

Конструкционные материалы на основе *органических вяжущих веществ*, как и предыдущие их группы на основе *неорганических вяжущих*, являются безобжиговыми композитами. К ним относятся асфальтовые бетоны и растворы, дегтебетоны, полимербетоны и другие композиции на основе битумных и дегтевых вяжущих, а также полимерных вяжущих. Связующее вещество (матрица) в этих материалах, как и в композитах на основе неорганических вяжущих, формируется путем взаимодействия между жидкой дисперсионной средой, в качестве которой выступает органическое вяжущее, и твердой дисперсной фазой – порошкообразным компонентом.

*Органические вяжущие вещества* представляют собой природные или искусственные твердые, вязкопластичные или жидкие (при обычной температуре) вещества, состоящие из химических соединений с атомами углерода, обладающие способностью отвердевать и сцепляться (иметь достаточную адгезию) с минеральными или органическими наполнителями и заполнителями, растворяться в органических растворителях. К органическим вяжущим относят битумные и дегтевые вяжущие (битумы, дегти и композиции на их основе – битумно-резиновые, битумно-полимерные и др.), часто называемые «черными» вяжущими, и полимерные вяжущие (олигомеры, полимеры и сополимеры). Эти вяжущие придают материалам водоотталкивающие свойства (гидрофобность) и водостойкость, эластичность, малую пористость. Поэтому органические вяжущие широко используются в изоляционных и кровельных материалах. Определенное количество их применяется в конструкционных материалах типа бетонов, растворов и изделий из них.

### 11.1. Битумные и дегтевые вяжущие

**Битумы** (от санскритского «гвитумен», т.е. смола) – *органические вещества черного или темно-бурого цвета, состоящие из смеси высокомолекулярных углеводов и их неметаллических производных, т.е. соединений углеводов с серой, азотом или кислородом*. При обычных температурах битумы могут находиться в твердом, вязком или жидком состоянии. Плотность битумов немного более 1 г/см<sup>3</sup>.

Различают природные и искусственные (нефтяные) битумы. *Природные* битумы встречаются в местах нефтяных месторождений, образуя линзы, а иногда и асфальтовые озера. Однако чаще они пронизывают осадочные (битуминозные) горные породы. *Нефтяные* битумы получают путем переработки нефти. При ее нагревании выделяют легкие фракции (бензин,

лигроин, керосин), а затем масла (машинные и др.). В конечном итоге остается густой смолистый остаток – *гудрон*. Он является исходным сырьем для получения вязкого и твердого битума, но может использоваться и в качестве битумного вяжущего, особенно в случае использования высокосмолистых нефтей. В зависимости от способа получения нефтяные битумы бывают: *окисленные*, получаемые окислением гудрона (продувкой воздуха); *остаточные*, получаемые из гудрона путем дальнейшего глубокого отбора из него масел; *крекинговые*, получаемые окислением остатков, образующихся при крекинге нефти; *битумы деасфальтизации*, получаемые осаждением асфальтеносмолистой части гудрона пропаном; *кислотные битумы*, получаемые переработкой кислых гудронов.

*Химический состав* битумов. *Элементарный состав* (% по массе): углерод – 70-80, водород – 10-15, сера – 2-9, кислород – 1-5 и азот – 0-2. Эти элементы образуют предельные углеводороды различных рядов (ароматического, парафинового, нафтенового) от  $C_9H_{20}$  до  $C_{30}H_{62}$  с различной молекулярной массой (от 300 до 5000).

Большое значение имеет *групповой состав* битумов. Он включает: а) *масла* (35-60 %) с молекулярной массой 300 – 600, плотностью менее  $1 \text{ г/см}^3$ ; они выделяются растворением в легком бензине; б) *смолы* – вязкопластические вещества (20-40 %) с молекулярной массой 600 – 1000, плотностью около  $1 \text{ г/см}^3$ ; растворяются в бензоле, хлороформе; в) *асфальтены* – твердая часть битума (10-40 %) с молекулярной массой 1000 – 5000, плотностью более  $1 \text{ г/см}^3$ ; растворяются только в горячем бензоле и четыреххлористом углероде. В битумах встречаются парафины – твердые метановые углеводороды (до 6-8 %), снижающие пластичность битума и увеличивающие его хрупкость.

По *внутреннему строению* битум представляет собой коллоидную систему, дисперсионной средой в которой является раствор смол в маслах, а дисперсной фазой – частицы асфальтенов (10-20 мкм), окруженные оболочками убывающей плотности от смол – к маслам. При изменении группового состава битума, в том числе под влиянием внешних факторов (температуры и др.), изменяются его свойства. При понижении содержания асфальтенов и смол (при повышении температуры – за счет частичного растворения смол в маслах) структура битума становится типа «золь», с малой плотностью и вязкостью. При повышении содержания асфальтенов и смол (при понижении температуры – за счет обратного перехода) структура битума становится типа «гель», с большей плотностью и вязкостью.

*Физические свойства* битумов: плотность в зависимости от группового состава –  $0,8-1,3 \text{ г/см}^3$ ; теплопроводность характерна для аморфных веществ и составляет  $0,5-0,6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

По *структурно-механическим свойствам* битумы являются типичными реологическими телами. Жидкие битумы при обычной температуре, а вязкие и твердые битумы при повышенных температурах ведут себя как

ньютоновские и структурированные жидкости. Вязкие и твердые битумы при обычной температуре являются упруговязкими и упруговязкопластичными телами, а при отрицательных температурах становятся упругохрупкими.

К *физико-механическим (техническим) свойствам* битумов относятся: глубина проникания иглы в битум, или твердость, и растяжимость, или пластичность (для твердых и вязких битумов), условная вязкость (для жидких битумов), а также температура размягчения.

*Глубина проникания иглы (пенетрация)* определяется (в десятых долях миллиметра – градусах) на приборе-пенетрометре при действии на иглу груза 100 г в течение 5 с при температуре 25 °С или при грузе 100 г в течение 60 с – при 0 °С.

*Растяжимость (дуктильность)* определяется на приборе-дуктилометре по длине нити в момент разрыва образца (в сантиметрах) при температура испытания 25 и 0 °С.

*Условная вязкость* жидких битумов характеризуется временем истечения 50 см<sup>3</sup> битума через отверстие вискозиметра определенного диаметра при стандартных температурах.

*Температура размягчения* отражает переход битума из вязкопластического состояния в жидкое. Она определяется на приборе «кольцо и шар» («КиШ»). За температуру размягчения принимается температура, при которой металлический шарик, продавливая битум при нагревании, касается нижней полки прибора.

Важным свойством битума является *адгезия* – прилипание к поверхности минеральных и органических материалов. Оценивают адгезию по визуальному методу по пятибалльной шкале. Если после кипячения в дистиллированной воде пленка полностью сохраняется, то адгезия оценивается пятью баллами (прилипание отличное), если пленка полностью смещается с минеральных зерен и всплывает на поверхность воды, то прилипание оценивается одним баллом (прилипание плохое).

В зависимости от показателей основных свойств битумы делят на *марки*. Твердые и вязкие *нефтяные битумы (БН)* вырабатывают четырех марок: БН 60/90, БН 90/130, БН 130/200, БН 200/300 (цифры дроби – допустимые для данной марки пределы пенетрации при 25 °С).

Для обозначения марок битумов специального назначения вводится дополнительная буква (Д – дорожный, К – кровельный и т.д.).

*Битумы нефтяные дорожные (БНД)* имеют марки: БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130, БНД 130/200, БНД 200/300 (цифры дроби – допустимые для данной марки пределы пенетрации при 25 °С).

Для изготовления кровельных и гидроизоляционных материалов применяют *битумы кровельные (БНК)* марок: БНК 45/180 (пропиточные), БНК 90/40 и БНК 90/30 (покровные). Здесь числитель дроби указывает



среднее значение температуры размягчения, знаменатель – среднее значение пенетрации при температуре 25 °С.

*Битумы строительные (БН)* бывают марок БН 50/50, БН 70/30, БН 90/10. Здесь числитель – средняя температура размягчения, знаменатель – среднее значение пенетрации.

Жидкие битумы в зависимости от *скорости загустевания* подразделяются на среднегустеющие (СГ), получаемые разжижением дорожных битумов жидкими нефтепродуктами, и медленногустеющие (МГ и МГО), получаемые из остаточных или частично окисленных нефтепродуктов или их смесей. Тот или иной класс битума определяется количеством испарившегося разжижителя при выдерживании образца битума в термостате или вакуумтермостате при определенных температурах. В зависимости от условной вязкости *среднегустеющие* битумы имеют марки: СГ 40/70, СГ 70/130, СГ 130/200; *медленногустеющие* – МГ 40/70, МГ 70/130, МГ 130/200, МГО 40/70, МГО 70/130, МГО 130/200.

*Отвердевание* битумов может происходить в объемном и пленочном состояниях. В *объемном* состоянии отвердевание идет в результате охлаждения, образования сетчатой структуры из макромолекул и повышения его вязкости. Отвердеванию битума в *пленочном* состоянии способствует, кроме того, физико-химическое взаимодействие его макромолекул с поверхностью зерен заполнителя и особенно порошкообразного наполнителя (минерального порошка). В жидких битумах как фактор отвердевания существенно испарение легких фракций разжижителя или самого битума. Наиболее благоприятный комплекс эксплуатационных свойств конструкционных материалов на основе битумов достигается при максимально возможном пленочном состоянии битума и минимальном количестве его в объемном состоянии.

К *добавкам*, улучшающим свойства битумов, относятся добавки поверхностно-активных веществ, полимеров, а также измельченной резины из отслуживших автомобильных покрышек и т.п.

*Полимерные добавки* можно отнести к структурирующим, которые позволяют расширить интервал работоспособности материала, так как с их введением повышается тепло- и морозостойкость. Однако следует иметь в виду, что иногда полимерная добавка может ускорить старение композиции под влиянием атмосферных факторов, поэтому рекомендуется выбирать атмосферостойкие полимеры. Кроме того, полимеры с битумами трудно совмещаются. В настоящее время изучено совмещение с битумом большинства известных полимеров, хотя пока еще мало из них реально используется в производстве битумных материалов.

Полимерные добавки улучшают упругие свойства, растяжимость, когезию органических вяжущих (битумов и дегтей). Наибольшее применение получили эпоксидные смолы, поливинилацетат, полистирол, синтетические каучук и латекс, натуральный латекс, обычно находящиеся в состоя-

нии растворов или латексов (водных дисперсий) и количество которых в горячем битуме или дегте составляет 1 – 6 % от массы вяжущего. Синтетические и натуральные каучуки используются для модификации вязких и жидких битумов и дегтей.

При смешивании с битумами каучуки создают в битуме самостоятельную решетку, способную воспринимать деформации битума. Для увеличения прочности битумно-полимерного материала можно частично или полностью завулканизировать каучук, при этом каучук сначала набухает в битуме, а затем частично растворяется. В последнем случае снижается температура хрупкости материала с одновременным повышением его теплостойкости.

Дивинилстирольные и изопренстирольные термоэластопласты являются наиболее технологичными добавками к битумам, так как при нагревании они расплавляются и при перемешивании быстро образуют гомогенную смесь. Эти сплавы превосходят битумно-каучуковые за счет их более равномерного распределения в битумах при перемешивании.

При получении сплавов битума с полимером или каучуком нередко добавляются стабилизаторы, вулканизирующие реагенты, ускорители и другие дополнительные компоненты.

Из отходов промышленности чаще других используют атактический полипропилен, вторичные полиэтилены, различные кубовые остатки, например кубовые остатки ректификации стирола, регенераты резины и др.

**Дегти** каменноугольные, сланцевые, торфяные и древесные получают путем сухой (без доступа воздуха) перегонки соответствующих видов твердого топлива. Для строительных целей применяются *дегтевые вяжущие*, состоящие из отогнанного дегтя, который получают после отбора из сырых каменноугольных дегтей летучих фракций, и составленного дегтя, который изготовляют смешением горячего пека с дегтевыми маслами (антраценовым и др.) или обезвоженными сырыми дегтями.

**Пек** – твердое или вязкое аморфное вещество черного цвета. Это остаточный продукт перегонки каменноугольных дегтей при температуре более 360 °С.

В состав дегтевых вяжущих входят в основном непредельные углеводороды ароматического ряда – производные бензола и их соединения с кислородом, азотом и серой. Поэтому атмосферостойкость материалов на основе дегтевых вяжущих ниже по сравнению с битумными материалами (дегти стареют быстрее, чем нефтяные битумы). В то же время биостойкость дегтевых материалов выше, что объясняется высокой токсичностью содержащегося в дегтях фенола (карболовой кислоты).

## 11.2. Асфальтовые бетоны и растворы

*Асфальтобетон (асфальтобетонная смесь) – важнейший дорожно-строительный материал, получаемый в результате уплотнения при оп-*

тимальной температуре рационально рассчитанной и приготовленной смеси, состоящей из битумного вяжущего, минерального порошка и заполняющих компонентов. При отсутствии в смеси крупного заполнителя (щебня или гравия) этот материал именуется *песчаным асфальтом* или *асфальтовым раствором*. В асфальтовых растворах и бетонах матричным компонентом, соединяющим зерна заполнителей в единое целое, является *асфальтовое связующее* (называемое также асфальтовым вяжущим), представляющее собой композицию нефтяного битума с тонкомолотым минеральным порошком (как правило, из известняка, доломита и других карбонатных пород). Минеральный наполнитель не только уменьшает расход битума, но и повышает прочностные свойства и теплостойкость материала (за счет перевода битума из объемного в пленочное состояние).

В зависимости от *вида минеральной составляющей* различают асфальтобетонные смеси: щебеночные, гравийные, песчаные. В зависимости от *температуры укладки* асфальтобетонные смеси бывают: *горячие* – изготавливаемые на вязких нефтяных дорожных битумах и применяемые непосредственно после приготовления – с температурой укладки не менее 120 °С, и *холодные* – изготавливаемые на жидких битумах – с температурой укладки свыше 5 °С. Среди горячих иногда выделяют *теплые* асфальтобетонные смеси – изготавливаемые на вязких и жидких битумах – с температурой укладки не менее 70 °С.

Наиболее распространены *горячие* асфальтобетонные смеси. В зависимости от величины *остаточной пористости* асфальтобетоны из этих смесей делят: а) на высокоплотные с остаточной пористостью 1-2,5 %; б) плотные с остаточной пористостью 2,5-5 %; в) пористые с остаточной пористостью 5-10 % (для нижних слоев покрытий и основания); г) высокопористые с остаточной пористостью 10-18 %.

В зависимости от *наибольшего размера минеральных зерен* горячие смеси подразделяют: а) на крупнозернистые (с зернами до 40 мм); б) мелкозернистые (с зернами до 20 мм); в) песчаные (с зернами до 5 мм). Холодные смеси подразделяют на мелкозернистые и песчаные. Горячие щебеночные и гравийные смеси в зависимости от *содержания в них щебня или гравия*, а также песчаные горячие смеси в зависимости от *вида песка* подразделяют на типы: А – многощебенистые (с содержанием щебня от 50 до 60 %); Б – среднещебенистые (с содержанием щебня от 40 до 50 %); В – малощебенистые (с содержанием щебня от 30 до 40 %); Г – песчаные смеси на песках из отсевов дробления, а также их смесях с природным песком при содержании последнего не более 30 %; Д – песчаные на природных песках или смесях природных песков с отсевами дробления при содержании последних менее 70 % по массе. Холодные щебеночные и гравийные смеси соответственно подразделяют на типы Б<sub>х</sub> и В<sub>х</sub>, а холодные песчаные смеси – на типы Г<sub>х</sub> и Д<sub>х</sub>.

**Исходные материалы для асфальтобетонов.** Марку *битума* выбирают в зависимости от вида асфальтобетона, климатических условий строительства, категорий дороги. В необходимых случаях применяют полимерно-битумные вяжущие и модифицированные битумы.

Для асфальтобетонных смесей *минеральный порошок* получают путем тонкого измельчения известняков, доломитов и других карбонатных пород, а также основных доменных шлаков. В горных породах для приготовления *неактивированного* минерального порошка содержание глинистых примесей не должно превышать 5 %. Для приготовления *активированного* минерального порошка в горную породу перед измельчением вводят активирующую смесь, состоящую из битума и поверхностно-активного вещества (ПАВ) или продукта, содержащего ПАВ. Тонкость помола порошков должна быть такой, чтобы при мокром расसेве сквозь сито с отверстиями 1,25 мм проходило 100 %; 0,315 мм – соответственно для активированного и неактивированного порошка – не менее 95 и 90 %; 0,071 мм – не менее 80 и 70 % порошка по массе. Активированный минеральный порошок должен быть гидрофобным. Активированные порошки при хранении не комкуются, улучшают перемешивание и уплотнение смесей; расход битума при приготовлении асфальтобетона уменьшается.

В качестве *крупного заполнителя* применяют щебень с размерами зерен от 5 (3) до 20 мм (в крупнозернистых смесях – до 40 мм) из горных пород магматического и метаморфического происхождения с прочностью не менее 100 МПа в водонасыщенном состоянии, а также пород осадочного происхождения и доменных шлаков с прочностью не менее 80 МПа. Морозостойкость щебня должна составлять не менее 50 циклов испытания на морозостойкость для верхнего и не менее 25 – для нижнего слоев дорожного покрытия. Гравий применяется тех же размеров, но его свойства хуже, чем у щебня, поэтому рекомендуется не менее 50 % гравия дробить в щебень.

*Мелким заполнителем* асфальтобетона является песок. Используют как дробленый песок (в т.ч. высевы при дроблении щебня), так и природный (речной, овражный, горный) с размерами зерен 0,14 - 5 (3) мм. Содержание в природном песке пылеватых, глинистых и илистых примесей должно быть не более 3 %, в том числе частиц менее 0,14 мм – не более 15 %. С целью улучшения зернового состава минеральной части асфальтобетона (достижения минимальной пустотности смеси заполнителей) песок делят на две фракции по граничному зерну 1,25 или 0,63 мм в зависимости от крупности песка либо используют смесь двух песков (крупного и среднего).

**Структуру асфальтобетона** образует заполняющая смесь щебня или гравия с песком, скрепленная в монолит асфальтовязущим веществом. *Микроструктура* асфальтового связующего состоит из дискретных частиц минерального порошка и матричного вещества – битума.

На каждом уровне структуры можно выделить следующие ее типы. *Порфировая (базальная)* характеризуется относительно большим количеством матричного связующего вещества, т.е. «плавающим» положением заполнителя (на макроуровне). Характерна для асфальтобетона из малощебеночных смесей, при этом свойства заполнителя практически не оказывают влияния на свойства материала. Такую структуру имеет литой асфальтобетон (из высокопластичных смесей). В случае *контактной* структуры дискретные частицы контактируют между собой через тонкие непрерывные пленки связующего. Такая структура в частности характерна для среднещебеночной асфальтобетонной смеси. Здесь в полной мере проявляются свойства заполнителя, но важны также и свойства асфальтового связующего. Контактная структура, как правило, обеспечивает наиболее высокие прочностные и другие эксплуатационные свойства материала. *За-контактная* структура характерна для многощебеночных смесей. Асфальтового связующего недостаточно для заполнения пор и создания непрерывной пленки на частицах минеральных компонентов. Такие асфальтобетоны имеют высокую остаточную пористость и дренирующую способность – пропускать воду; применяются для нижнего слоя асфальтобетонного покрытия. Наилучшая структура асфальтобетона, обеспечивающая заданный комплекс как технологических (пластичность смесей), так и эксплуатационных свойств, получается в результате оптимального совмещения необходимых типов структур на каждом уровне.

*Пористость* ухудшает долговечность асфальтобетона в связи с возрастанием водопоглощения, снижением морозостойкости и химической стойкости.

**Свойства асфальтобетонов** зависят от состава, структуры и свойств составляющих материалов. Выбирают материалы в зависимости от типа асфальтобетона и его назначения в дорожной одежде. В любом случае материалы должны соответствовать техническим требованиям, обусловленным ролью в асфальтобетоне.

*Механические* свойства асфальтобетона в целом сильно зависят от температуры. Он может вести себя как упругохрупкое (при отрицательных температурах), как упруговязкопластичное (при обычных температурах), как вязкопластичное тело (при повышенных температурах).

*Прочность* асфальтобетона определяют при нескольких температурах (25, 0 и 50 °С) и с заданной скоростью нагружения. При испытании на сжатие используют цилиндрические образцы размерами (диаметр и высота) 50,5×50,5 или 71,4×71,4 мм (в зависимости от крупности заполнителя). Прочность асфальтового связующего и асфальтобетона в целом во многом зависит от фазового отношения, т.е. соотношения битума и минерального порошка (Б/П), которое определяет при необходимом уплотнении смеси пористость материала после отвердевания. При оптимальном Б/П весь битум адсорбирован в виде тонких непрерывных пленок на поверхности час-

тиц минеральных компонентов (прежде всего порошкообразного наполнителя), и асфальтовое связующее имеет наибольшую прочность. Кроме того, прочность асфальтобетона зависит от содержания и вида песка и щебня, температуры и т.д. При температуре 20 °С предел прочности при сжатии асфальтобетона обычно составляет около 2,5 МПа, а при растяжении – в 6-8 раз меньше. С повышением температуры предел прочности при сжатии снижается до 1,0-1,2 МПа (при 50 °С). Для повышения прочности асфальтобетона необходимо применять щебень и дробленый песок вследствие их шероховатой поверхности и улучшения сцепления с битумом (в случае гравия и природного песка прочность будет ниже). Относительное содержание компонентов должно обеспечивать наиболее плотную структуру материала, т.е. минимальную остаточную пористость.

Достижение наибольшей прочности вступает в определенное противоречие с трещиностойкостью асфальтобетона. *Трещиностойкость*, т.е. сопротивляемость асфальтобетона температурным растягивающим напряжениям, может быть обеспечена применением возможно менее вязких битумов, деформативность которых сохраняется при низких температурах. Поэтому выбор показателей механических свойств зависит от условий эксплуатации. В теплом климате используют асфальтобетоны из менее пластичных смесей, в холодных условиях – асфальтобетоны с повышенной трещиностойкостью – из более пластичных смесей, а также теплые и холодные асфальтобетоны.

Важными свойствами асфальтобетона являются также водостойкость, морозостойкость, износостойкость. *Водостойкость* оценивается отношением пределов прочности при сжатии образцов в водонасыщенном (в том числе при длительном водонасыщении) и сухом состояниях при температуре 20 °С. О водоустойчивости асфальтобетона также судят по величине *набухания* при насыщении образцов водой. Водостойкость асфальтобетона должна быть в пределах 0,6-0,9; величина набухания в воде не более 0,5 % (по объему).

В зависимости от показателей физико-механических свойств и применяемых материалов асфальтобетонные смеси и асфальтобетоны подразделяются на *марки*. Показатели физико-механических свойств плотных асфальтобетонов из горячих смесей различных марок для II и III дорожно-климатических зон должны соответствовать требованиям, указанным в табл. 3.

**Определение состава асфальтобетона.** Проектирование асфальтобетона – это комплексный процесс, позволяющий правильно определить его состав с учетом работы в условиях воздействия транспортных средств и окружающей среды. В зависимости от этого назначают вид и тип асфальтобетона, определяют требования, предъявляемые к асфальтобетонной смеси и асфальтобетону. Проектирование асфальтобетона включает в себя три этапа.

На *первом этапе* производят выбор исходных материалов с учетом их стоимости и дефицитности. Целесообразно использовать местные материалы и вторичные ресурсы (отходы других отраслей промышленности – шлаки, золы и др.). Привозные материалы необходимо применять только в случае невозможности замены их местными или как дополнение к местным материалам, например с целью их обогащения.

Таблица 3. Показатели физико-механических свойств плотных асфальтобетонов из горячих смесей для II и III дорожно-климатических зон

Показатель	Нормы для асфальтобетонов из смесей марок		
	I	II	III
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре:			
20°C, для асфальтобетонов всех типов, не менее	2,5	2,2	2,0
50°C, для асфальтобетонов типов, не менее:			
А	1,0	0,9	–
Б	1,2	1,0	0,9
В	–	1,2	1,1
Г	1,3	1,2	1,0
Д	–	1,3	1,1
0°C, для асфальтобетонов всех типов, не более	11,0	12,0	12,0
Водостойкость, не менее	0,90	0,85	0,75
Водостойкость при длительном водонасыщении, не менее	0,85	0,75	0,65

На *втором этапе* производят собственно определение состава асфальтобетона, включающее: а) расчет зернового состава минеральной части; б) определение оптимального количества битума.

*Третий этап* проектирования – это приготовление и испытание образцов из контрольной смеси и уточнение состава асфальтобетона.

*Расчет минеральной части* асфальтобетона заключается в определении количества фракций минеральных компонентов, их оптимального соотношения между собой, а также соотношения самих компонентов (щебень, песок, минеральный порошок) для достижения наибольшей плотности смеси, т.е. наиболее плотной упаковки зерен и частиц. Применяют смеси с непрерывной (в смеси существуют в определенном соотношении зерна соседних фракций с близкими размерами) и прерывистой гранулометрией (когда отсутствуют некоторые фракции и зерна сильно отличаются по размерам). На практике наиболее плотную упаковку создают смеси с *прерывистой гранулометрией*, т.к. потенциальная возможность заполнения пор между крупными частицами более мелкими в смесях с *непрерывной гранулометрией*, как правило, не реализуется из-за трудности проник-

новения частиц между друг другом. Кроме того, для получения последних смесей необходимы в достаточном количестве мелкозернистые фракции заполнителя, что требует наличия крупного песка с модулем крупности выше 2,5 или высевок от отходов камнедробления для обогащения более мелких песков. В то же время асфальтобетонные смеси на основе минеральной части с непрерывной гранулометрией, как правило, более пластичны. На практике применяют смеси как с прерывистой, так и с непрерывной гранулометрией, и имеются рекомендации по зерновому составу для тех и других смесей с целью получения наиболее плотной их упаковки.

Расчет зернового состава минеральной части асфальтобетона с непрерывной гранулометрией осуществляют по кривым плотных смесей. Для этого предельные размеры зерен соседних фракций должны отличаться в 2 раза, т.е.

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{d_2}{d_3} = \dots = \frac{d_{m-1}}{d_m} = 2,$$

где  $d_1$  – наибольший диаметр зерен минеральной части, устанавливаемой в зависимости от типа асфальтобетона, мм;  $d_m$  – наименьший диаметр зерен, соответствующий пылевой фракции минерального порошка (обычно 0,005 мм).

Число фракций  $n$  на единицу меньше числа размеров  $m$ , и его можно определить по формуле

$$n = 3,32 \cdot \lg \frac{d_1}{d_m}.$$

Величина, показывающая, во сколько раз количество (массовая доля) последующей фракции меньше предыдущей, называется коэффициентом сбега  $K$ . При  $K = 0,8$  смесь получается с наибольшей плотностью. Поскольку подобрать именно такую смесь трудно, то рекомендуется принимать коэффициент сбега в пределах 0,7 – 0,84, при этом смеси получаются достаточно плотными. Зная размеры фракций, их количество и принятый коэффициент сбега  $K$  (0,7 и 0,84), определяют массовое количество в процентах каждой фракции по формулам

$$a_2 = a_1 \cdot K,$$

$$a_3 = a_2 \cdot K = a_1 \cdot K^2,$$

.....

$$a_n = a_{n-1} \cdot K = a_1 \cdot K^{n-1},$$

где  $a_1$  – количество первой (наиболее крупной) фракции, %;  $a_2, a_3, \dots, a_n$  – количество последующих фракций, %.

Сумма всех фракций (по массовому содержанию) равна 100 %, т.е.



$$a_1 + a_1 \cdot K + a_1 \cdot K^2 + a_1 \cdot K^{n-1} = 100 ,$$

$$\text{или } a_1 \cdot (1 + K + K^2 + \dots K^{n-1}) = 100 .$$

В скобках указана сумма геометрической прогрессии, следовательно, количество первой фракции, %, в смеси

$$a_1 = \frac{1 - K}{1 - K^n} \cdot 100 .$$

По этой формуле определяют процентное содержание первой фракции для  $K = 0,7$  и  $K = 0,84$ . Затем определяют количество последующих фракций и на основании полученных данных строят предельные кривые плотных смесей, соответствующие предельным значениям коэффициента сбега. Кривая гранулометрического состава конкретной рассчитываемой смеси должна располагаться между предельными кривыми.

При невозможности расчета плотной минеральной смеси с непрерывной гранулометрией (при отсутствии крупнозернистых песков и невозможности обогащения мелких песков высевами) необходимая плотность может быть достигнута и для смесей с прерывистой гранулометрией. В этом случае получают более жесткий каркас минеральной части вследствие меньшей раздвижки зерен.

*Оптимальное количество битума* на практике часто определяют опытным путем, формуя 3-4 серии образцов с отличающимся на 0,5 % содержанием битума, и проводя полный комплекс их испытаний.

Кроме того, оптимальное количество битума можно найти по пустотности минерального остова и заданной остаточной пористости асфальтобетона. Для этого формуют образцы с заведомо малым содержанием битума и определяют остаточную пористость этих образцов по формуле

$$\Pi_o = \left(1 - \frac{\rho_{аб}}{(100 + B_{пр}) \cdot \rho_o}\right) \cdot 100 ,$$

где  $\Pi_o$  – остаточная пористость, %;  $\rho_{аб}$  – плотность образца асфальтобетона;  $B_{пр}$  – содержание битума в образцах, %;  $\rho_o$  – средняя плотность минеральной части.

Затем рассчитывают оптимальное количество битума  $B$  по формуле

$$B = \Pi_o \cdot \varphi \cdot \rho_{б} \cdot \frac{100 + B_{пр}}{100} ,$$

где  $\varphi$  – коэффициент заполнения пустот битумом;  $\rho_{б}$  – плотность битума;

$$\varphi = \frac{\Pi_o - \Pi}{\Pi_o} ,$$

где  $\Pi$  – заданная остаточная пористость асфальтобетона, %.

После определения оптимального количества битума по заданной остаточной пористости асфальтобетона обязательно готовят и испытывают контрольные смеси – с найденным количеством битума, а также с большим и меньшим количеством на 0,5 %.

**Разновидности асфальтобетона.** К разновидностям асфальтобетона относят теплые и холодные асфальтобетонные смеси (асфальтобетоны), а также литой и цветной асфальтобетон.

*Теплый* асфальтобетон предназначен для дорожных покрытий капитального типа и устройства нижних слоев покрытий. Исходные материалы: менее вязкие нефтяные битумы БНД 200/300, БНД 130/200, а также жидкие битумы СГ 130/200; СГ 70/130. В качестве минерального порошка используется известняковый порошок более тонкого помола. В качестве заполнителей: щебень и дробленый песок, а также прочные шлаки. Эти компоненты должны обладать шероховатой поверхностью для улучшения связей с битумным вяжущим. Температура укладки теплого асфальтобетона должна быть не менее 70 °С. Для этого температура смеси на выходе из смесителя должна быть в пределах 90-130 °С. Допустимые пределы температуры смеси при ее уплотнении в покрытии: не менее 50 °С – в теплую погоду и при марке битума СГ 70/130; не более 100 °С – в холодную и при марке битума СГ 130/200. Закономерности формирования структуры теплого асфальтобетона связаны с применением вязких или жидких битумов. На вязких битумах структура образуется при уплотнении и охлаждении смеси, и при этом набирается проектная прочность. На жидких битумах формирование структуры происходит длительное время, и после охлаждения набирается около 80 % марочной прочности. Последующее твердение происходит в результате постепенного испарения легких фракций и доуплотнения асфальтобетона колесами транспортных средств.

*Холодные* асфальтобетонные смеси укладываются с температурой, равной температуре окружающего воздуха (не ниже 5 °С). Этого добиваются использованием жидких или разжиженных вязких битумов. Иногда используют битумные эмульсии. Разжижают вязкий битум с помощью органического растворителя, а битумные эмульсии получают на основе воды, которая выступает в роли разбавителя. Холодный асфальтобетон изготавливают в горячем или холодном состоянии. В горячем состоянии его получают на разжиженном вязком или жидких битумах. В холодном – на основе битумной эмульсии. Если смесь готовят непосредственно перед укладкой, то стремятся укладывать ее в теплом состоянии. В этом случае, вследствие большой пластичности, смесь лучше распределяется по поверхности покрытия и дает более прочный слой. Особенностью холодного асфальтобетона является то, что эти смеси можно хранить длительное время на складе (до 8-10 месяцев). При чрезмерно длительном хранении эти смеси могут слеживаться, что резко ухудшает возможность уплотнения и полу-

чения качественного покрытия. С целью недопущения этого явления в смесь вводят добавки ПАВ и других модифицирующих веществ: ЛСТ (ССБ), хлорное железо и другие (до 2 %). Эти же вещества улучшают адгезию битума с поверхностью не полностью просушенного минерального заполнителя.

При укладке холодного асфальтобетона не стремятся использовать интенсивное уплотнение, чтобы не замедлить набор прочности. Набор прочности происходит вследствие испарения растворителя из разжиженного вязкого битума или легких фракций из жидкого битума, а интенсивное уплотнение будет препятствовать этому процессу. Холодный асфальтобетон на битумной эмульсии можно укладывать во влажную погоду. После укладки с необходимым уплотнением (легкими катками) в определенный период не допускается интенсивное движение. Но в то же время учитывают необходимость дополнительного уплотнения асфальтобетона при движении транспортных средств. Холодные асфальтобетонные смеси типов Б<sub>х</sub>, В<sub>х</sub> и Г<sub>х</sub> подразделяют на две марки (I и II), типа Д<sub>х</sub> могут быть только II марки. Свойства холодного асфальтобетона: предел прочности на сжатие при 20 °С составляет до 2 МПа; водостойкость – не менее 0,8. Асфальтобетоны из холодных смесей должны иметь остаточную пористость от 6 до 10 %. Такие показатели достигаются за счет использования фракционированного заполнителя, в качестве которого применяется щебень и дробленый песок, обладающие шероховатой поверхностью, а также известнякового минерального порошка.

Холодный асфальтобетон в настоящее время применяется реже, чем другие виды асфальтобетона, но он, несомненно, перспективен ввиду того, что при соблюдении необходимой технологии покрытие из этого материала по качеству не уступает другим асфальтобетонам; при этом имеется возможность круглогодичной загрузки асфальтобетонных заводов.

*Литой* асфальтобетон характеризуется высокой пластичностью смеси, что позволяет легко уложить эту смесь с небольшим уплотнением или даже без него. Таких свойств смеси добиваются за счет базальной структуры материала («плавающего» заполнителя), при которой нет непосредственного контакта между зернами заполнителя, и последние разделены достаточно толстой пленкой битумного вяжущего. Этот материал приготавливается в горячем состоянии, и после изготовления (перед укладкой) не должно пройти длительное время. В противном случае масса подогревается в специальных машинах – термосах. При укладке производят легкое уплотнение, но иногда обходятся и без него. Уплотнение повышает качество покрытия за счет создания необходимой шероховатости его поверхности (с помощью рифленых вальцов). Кроме того, для повышения шероховатости и прочности верхнего слоя дополнительно посыпают покрытие мелким заполнителем (предварительно обработанным битумом). В целом этот материал требует повышенного расхода битума, а его свойства хуже, чем уп-

лотняемого асфальтобетона (пониженная прочность, малые сдвигоустойчивость в теплую погоду и трещиностойкость в холодную). Эффективность применения этой разновидности асфальтобетона может быть связана с определенными ремонтными работами.

*Цветной асфальтобетон* изготавливают на основе заполнителя светлых тонов и белого минерального порошка (щебень из отходов дробления мрамора или белого известняка, светлый кварцевый песок, минеральный порошок, получаемый помолом мрамора). В составе этого материала используются пигменты и пластификаторы. Цветной асфальтобетон – это система с достаточно сложной структурой, в частности, асфальтового связующего, что обусловлено близкими размерами частиц минерального порошка, пластификатора и пигмента. Для такой системы характерна мозаичная микроструктура, наилучший вариант которой достигается оптимальным соотношением средних размеров частиц этих компонентов и оптимальным соотношением их по массе. В качестве пигментов должны использоваться цветостойкие материалы (охра, крон желтый; железный сурик; оксид хрома). Для улучшения связывания дисперсных частиц в микроструктуре применяется комплексное связующее, при полной или частичной замене битума полимерами. Данный материал вследствие высокой стоимости применяют при необходимости обеспечения декоративных свойств покрытия на площадях, скверах, а также для оформления остановок городского транспорта, пешеходных переходов.

**Деструкция асфальтобетона в процессе его эксплуатации и меры борьбы с ней.** Все виды асфальтобетона в той или иной степени подвергаются деструкции в результате тепловых колебаний, влажностных и механических факторов. При этом происходит расшатывание структуры и ухудшение свойств материала. Под действием тепловых факторов постоянно меняется концентрация твердой фазы (спонтанное увеличение при охлаждении, уменьшение при нагревании, размягчение поверхности). При отрицательных температурах битум становится хрупким, появляются микро- и макротрещины. Кроме того, старение асфальтобетона происходит под действием ультрафиолетовых лучей, которое ведет к окислению молекул битума и уменьшению адгезии его к минеральным частицам. Действует и влажностный фактор – полярные молекулы воды способны вытеснять неполярные молекулы битума с поверхности минеральных компонентов. При вымерзании воды повышается пористость, снижается прочность покрытия. Комплексное воздействие тепла, холода, воды, ультрафиолета ведет, в конечном счете, к деструкции асфальтобетона.

С целью снижения влияния указанных факторов целесообразно использовать асфальтобетон с оптимальной структурой, лучше уплотнять покрытие, производить поверхностную обработку с целью его гидрофобизации, своевременно производить ремонт покрытия.

### 11.3. Полимерные материалы и изделия

*Полимерными называют материалы, в состав которых в качестве основного компонента входят высокомолекулярные органические вязущие вещества (полимеры).*

Благодаря способности в процессе переработки принимать требуемую форму и сохранять ее после снятия действующих усилий полимерные материалы называют также пластическими массами (пластмассами или пластиками). Пластмассы, применяемые в строительстве, представляют собой сложные композиции, состоящие из полимерного связующего, наполнителей, стабилизаторов, пластификаторов, отвердителей и других компонентов.

**Полимеры** (от греческого «поли» – много, «мерос» – часть, доля) – это высокомолекулярные вещества, молекулы которых состоят из большого количества звеньев одинаковой структуры, взаимодействующих друг с другом посредством ковалентных связей с образованием макромолекул.

По составу основной цепи макромолекул полимеры разделяют на три группы: а) карбоцепные полимеры – макромолекулярные цепи полимера состоят лишь из атомов углерода; б) гетероцепные полимеры, в состав цепей которых входят кроме атомов углерода еще атомы кислорода или серы, азота, фосфора и т.п.; в) элементоорганические полимеры, в основные цепи которых могут входить атомы кремния, алюминия, титана и других элементов, имеющие кремнийкислородные, силоксановые связи.

Полимеры могут иметь линейное, разветвленное или сетчатое (трехмерное) строение, что определяет физико-механические и химические свойства полимеров. Макромолекулы полимеров *линейного* строения вытянуты в виде цепей, связанных между собой слабыми силами межмолекулярного взаимодействия (рис. 9а). Для *разветвленных* полимеров характерно наличие мономерных звеньев, ответвленных от основной цепи макромолекулы (рис. 9б). *Сетчатые (трехмерные)* структуры полимеров характеризуются тем, что прочные химические связи между цепями («сшивки» отдельных линейных или разветвленных цепей полимера) приводят к образованию единого пространственного каркаса (рис. 9в).

Полимеры с макромолекулами линейного или разветвленного строения плавятся при нагревании с изменением свойств и растворяются в соответствующем органическом растворителе, а при охлаждении вновь затвердевают. Такие полимеры, способные многократно размягчаться при нагревании и затвердевать при охлаждении, называются термопластичными (термопласты). Напротив, полимеры с макромолекулами трехмерного строения имеют повышенную устойчивость к термическим и механическим воздействиям, не растворяются в растворителях, а лишь набухают.

Такие полимеры не могут обратимо размягчаться при повторном нагревании и носят название термореактивных полимеров (реактопласты).

Высокомолекулярные соединения характеризуются не только структурой молекул, но и *молекулярной массой*. Полимеры обычно имеют молекулярную массу свыше 5000 единиц; высокомолекулярные соединения с меньшей молекулярной массой называют олигомерами. По мере увеличения молекулярной массы полимера растворимость его в органических растворителях снижается, несколько снижается эластичность, однако прочность значительно возрастает.

Свойства многих полимеров неразрывно связаны с величиной молекулярной массы и межмолекулярных сил, которые слабее обычных валентных связей. При увеличении молекулярной массы полимера суммарный эффект межмолекулярных сил становится ощутимым, поскольку их источником является каждый атом. В этой связи возрастающая роль межмолекулярных сил при повышении молекулярной массы качественно отличает полимеры от низкомолекулярных соединений.

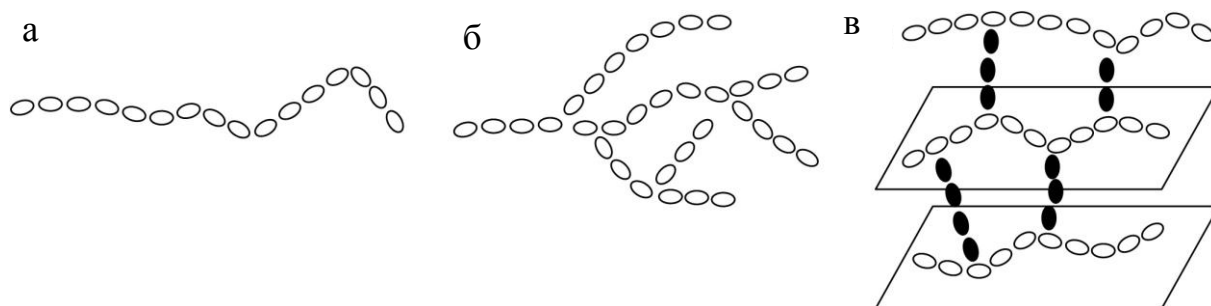


Рис. 9. Схематическое строение макромолекул полимеров с линейной (а), разветвленной (б), сетчатой (в) структурой

Для производства полимеров *основным сырьем* служат мономеры, т.е. вещества, способные соединяться друг с другом, образуя полимеры. Мономеры получают путем переработки природных и нефтяных газов, каменного угля, аммиака, угольной кислоты и других подобных веществ. В зависимости от метода получения полимеры подразделяются на полимеризационные, поликонденсационные и модифицированные природные.

*Полимеризационные* полимеры получают в процессе полимеризации мономеров вследствие раскрытия кратных связей (или раскрытия цикла) и соединения элементарных звеньев мономера в длинные цепи. Поскольку при реакции полимеризации атомы и их группировки не отщепляются, побочные продукты не образуются, химический состав мономера и полимера одинаков.

*Поликонденсационные* полимеры получают в процессе реакции поликонденсации двух или нескольких низкомолекулярных веществ. При этой реакции наряду с основным продуктом поликонденсации образуются по-

бочные соединения (вода, спирты и другие), а химический состав полимера отличается от химического состава исходных продуктов поликонденсации.

*Модифицированные* полимеры получают из природных высокомолекулярных веществ (целлюлоза, казеин) путем их химической модификации для изменения их первоначальных свойств в заданном направлении. Из ацетилцеллюлозы вырабатывают прочные и водостойкие лаки для окрашивания древесины и металла.

К **полимеризационным полимерам** (термопластам) относятся полиэтилен, полипропилен, полиизобутилен, поливинилхлорид, полистирол, полиметилметакрилат (органическое стекло), поливинилацетат и др. *Полиэтилен*  $[-CH_2-CH_2-]_n$  – продукт полимеризации этилена. Выпускается в виде гранул размером 3 – 4 мм или белого порошка. Технические свойства полиэтилена зависят от молекулярной массы, разветвленности цепи и степени кристалличности. Полиэтилен один из самых легких полимеров – его плотность меньше плотности воды (0,92-0,97 г/см<sup>3</sup>). Характеризуется высоким пределом прочности при растяжении (12-32 МПа), незначительным водопоглощением (0,03-0,04 %), высокой химической стойкостью и морозостойкостью. Следует учитывать особенности полиэтилена, свойственные всем полимерам с линейной структурой: сравнительно низкий модуль упругости (150-800 МПа), малую твердость, ограниченную теплостойкость (108-130 °С), большой коэффициент теплового расширения. Полиэтилен применяется для производства труб, пленок, теплоизоляционных газонаполненных материалов, тары и сантехнического оборудования.

*Поливинилхлорид* (ПВХ) является продуктом полимеризации винилхлорида ( $CH_2=CHCl$ ). Высокие механические свойства поливинилхлорида определили главные области его применения в строительстве. Из поливинилхлорида изготавливают гидроизоляционные и отделочные материалы, плитуса, поручни, оконные и дверные переплеты, линолеум и др. Ценным свойством поливинилхлорида является стойкость к действию кислот, щелочей, спирта, бензина, смазочных масел. Поэтому его широко применяют для производства труб, используемых в системах водоснабжения, канализации и технологических трубопроводов.

Недостатками поливинилхлорида является резкое понижение прочности при повышении температуры, а также ползучесть при длительном действии нагрузки.

*Полистирол*  $[-CH_2-CHC_6H_5-]_n$  – твердый продукт полимеризации стирола (винилбензола). При обычной температуре полистирол представляет собой твердый прозрачный материал, похожий на стекло, пропускающий до 90 % видимой части спектра. Выпускают полистирол в виде гранул (6-10 мм), мелкого и крупнозернистого порошка, а также в виде бисера (при суспензионном методе производства) с влажностью до 0,2 %.

Полистирол обладает высокими механическими свойствами (предел прочности на сжатие 80-110 МПа), водостоек, хорошо сопротивляется действию концентрированных кислот (кроме азотной и ледяной уксусной кислот), противостоит растворам щелочей (с концентрацией до 40 %). К недостаткам полистирола, ограничивающим его применение, относятся: невысокая теплостойкость, хрупкость, проявляющаяся при ударной нагрузке.

Применяют для изготовления гидроизоляционных пленок, облицовочных плиток, теплоизоляционных материалов, водопроводных труб и др.

Среди **поликонденсационных полимеров** (реактопластов) наиболее значимыми являются фенолформальдегидные, карбамидные (мочевиноформальдегидные), эпоксидные, кремнийорганические полимеры, полиуретаны и др. *Фенолформальдегидные* полимеры получают путем поликонденсации фенола с формальдегидом. Эти полимеры хорошо совмещаются с наполнителями - древесной стружкой, бумагой, тканью, стеклянным волокном, при этом получают пластики более прочные и менее хрупкие, чем сами полимеры. Поэтому фенолформальдегидные полимеры широко применяют в качестве связующего при изготовлении древесностружечных плит, бумажнослоистых пластиков, стеклопластиков и разнообразных изделий из минеральной ваты. Кроме того, они используются для производства клеев, водостойкой фанеры, спиртовых лаков.

Макромолекулы *кремнийорганических* полимеров состоят из чередующихся атомов кремния и кислорода, а углерод входит лишь в состав групп, обрамляющих главную цепь  $\text{SiH}_3$ . Наличие силоксановой связи придает свойства, присущие силикатным материалам (прочность, твердость, теплостойкость), а углеводородистых радикалов  $\text{CH}_3$  – органическим полимерам (эластичность и др.).

Полимеры характеризуются следующими техническими *свойствами*: термическими (температурой размягчения и теплостойкостью, температурой стеклования и текучестью), механическими (прочностью, деформативностью и поверхностной твердостью), химическими (атмосферостойкостью и сопротивляемостью деструкции).

В целом, наряду с положительными свойствами полимеров – малой средней плотностью (около 1 г/см<sup>3</sup>), низкой теплопроводностью, водо- и газонепроницаемостью, химической стойкостью, высоким коэффициентом конструктивного качества, практически неограниченной сырьевой базой и др. – они обладают и рядом недостатков. К ним относятся: низкая теплостойкость, невысокий модуль упругости, значительная ползучесть, склонность к старению, что в итоге определяет недостаточную долговечность. Кроме того, необходимо учитывать горючесть и определенную токсичность полимеров. Так, при получении многих полимерных материалов используются в качестве связующего фенолформальдегидные смолы, содержащие до 9 % свободного фенола, до 11 % свободного формальдегида и 1,5-2,0 % метанола. В процессе производства и эксплуатации изделий зна-



чительная часть этих высокотоксичных веществ выделяется в воздух. Пенополистирол при обычных условиях эксплуатации (и особенно при горении) выделяет высокотоксичный стирол. Пенополиуретановые теплоизоляционные материалы при горении образуют множество летучих высокотоксичных соединений, включая синильную кислоту.

**Наполнители** в пластических массах, снижая расход полимера, удешевляют пластмассы. Кроме того, структурируя полимерное связующее, они улучшают ряд технических свойств пластмасс: прочность, твердость, термостойкость, сопротивляемость усадке и ползучести и др.

Наполнители в зависимости от химической природы разделяют на органические и неорганические; в зависимости от формы и структуры – порошкообразные и волокнистые. В производстве полимерных композиционных материалов широко применяются органические и неорганические *порошкообразные* наполнители (древесная мука, отход целлюлозного производства – лигнин, микрослюда, кварцевая мука, тальк и т.д.).

*Волокнистыми* наполнителями служат целлюлозное, асбестовое и стеклянное, а также синтетические (из капрона, нейлона, лавсана и др.) волокна.

**Добавочные вещества.** Введение *пластификаторов* (эфиры алифатических и ароматических кислот и алифатических спиртов, эфиры гликолей и эфиры фосфорной кислоты, эпоксициклические и хлорированные соединения) позволяет улучшить условия переработки полимерных композиций, снизить их хрупкость. *Добавки-стабилизаторы* (антиоксиданты, термо- и светостабилизаторы) способствуют длительному сохранению свойств пластмасс в процессе их эксплуатации. *Отвердители* (сшивающие и вулканизующие агенты) обеспечивают процесс отверждения полимеров (формирование их пространственной структуры). Для получения окрашенных пластмасс используют *пигменты*. Стойкость пластмасс против возгорания повышают *антипирены*. Создание газонаполненных (ячеистых) пластмасс достигается с помощью *порообразователей*.

Все многообразие пластмасс в зависимости от *назначения* их в строительстве сводится к группам: конструкционным, кровельным, гидроизоляционным и герметизирующим; тепло- и звукоизоляционным; отделочным (покрытия полов и стен, лаки, краски, клеи и т.п.) материалам, а также материалам для инженерных коммуникаций. Основными *конструкционными* материалами на основе полимеров являются полимербетоны. К конструкционно-отделочным материалам относятся стеклопластики, бумажно-слоистые, угольные и другие пластики; древесноволокнистые и древесностружечные плиты (которые могут являться также конструкционно-теплоизоляционными материалами).

**Полимербетоны** – композиционные материалы, изготавливаемые преимущественно на основе термореактивных полимеров: полиэфирных, эпоксидных, фенолоформальдегидных, фурановых и др. Заполнители вы-

бираются в зависимости от вида агрессивной среды эксплуатации. Для кислых сред получают полимербетоны на кислотостойких заполнителях – кварцевом песке и щебне из кварцита, базальта или гранита. Используют также бой кислотоупорного кирпича, кокс, антрацит, графит. Наиболее высокие физико-механические свойства полимербетоны имеют на эпоксидных смолах. Для уменьшения расхода и стоимости эпоксидных смол их модифицируют каменноугольной смолой (до 35-50 %). Широкое распространение получили полимербетоны на фурановых полимерах, которые модифицируют эпоксидными смолами для улучшения свойств композиций.

Расход связующего составляет 100-200 кг на 1 м<sup>3</sup> полимербетона при соотношении полимера к наполнителю 1:5-1:12 по массе. Технология приготовления и уплотнения полимербетонов такая же, как и цементных. Термообработка при 40-80 °С значительно ускоряет процесс твердения. Полимербетоны (полимеррастворы) хорошо склеиваются с цементным бетоном, поэтому их применяют для ремонта железобетонных конструкций. Для уменьшения хрупкости полимербетона применяют волокнистые наполнители – асбест, стекловолокно и др. Полимербетоны отличаются от обычного цементного бетона не только *химической стойкостью* (особенно по отношению к кислотам), но и *высокими показателями прочности*, в особенности при растяжении (7-20 МПа) и изгибе (16-40 МПа). Прочность при сжатии достигает 60-120 МПа. Морозостойкость полимербетонов может иметь 200-300 и более циклов замораживания и оттаивания; теплостойкость 100-200 °С (до 300 °С). Но их стоимость в несколько раз выше цементных бетонов.

Применяют полимербетоны для химически стойких конструкций, износостойких покрытий, там, где высокая стоимость полимербетонов будет оправдана. Отрицательными свойствами полимербетонов являются их большая ползучесть и старение, усиливающееся при действии попеременного нагревания и охлаждения. Необходимо соблюдение специальных правил охраны труда при работе с полимерами и кислыми отвердителями, могущими вызвать ожоги. В частности необходимы хорошая вентиляция, обеспечение рабочих защитными очками, резиновыми перчатками, спецодеждой.

**Стеклопластики** – это композиционные листовые материалы, изготавливаемые из стеклянных волокон или тканей, связанных полимером. Связующим веществом в стеклопластиках обычно служат фенолоформальдегидные, полиэфирные и эпоксидные полимеры. Выпускают три разновидности стеклопластиков: на основе ориентированных волокон, рубленых волокон и тканей или матов. *Стеклопластики с ориентированными волокнами* (типа СВМ – стекловолокнистого анизотропного материала) обладают большой прочностью (при растяжении до 1000 МПа), легкостью (их плотность 1,8-2 г/см<sup>3</sup>), что в сочетании с химической стой-

костью делает их эффективным материалом для строительных конструкций, емкостей и труб. *Стеклопластики с рубленым стеклянным волокном* изготавливают в виде волокнистых или плоских листов на полиэфирном связующем, обладающим светопрозрачностью. Эти изделия применяют для устройства кровель, ограждений балконов, лоджий и перегородок. *Стеклопластики, изготавливаемые на основе стеклянной ткани (стеклотекстолиты)*, получают горячим прессованием полотнищ ткани, пропитанной термореактивным полимером, при высоком давлении и температуре. Стеклотекстолит идет для наружных слоев трехслойных стеновых панелей. Этот же материал применяют для устройства оболочек и других строительных конструкций. Стеклотекстолиты получают также прессованием пастообразной массы из полиэфирного полимера, стекловолокна, асбеста и порошкообразного наполнителя. Из этого материала формуют оконные и дверные блоки, фурнитуру, санитарно-технические изделия.

**Бумажно-слоистые пластики** изготавливают из нескольких слоев специальной бумаги, пропитанных фенолоформальдегидным или карбамидным полимером. Пластик выпускают в виде листов длиной 1000-3000 мм, шириной 600-1600 мм, толщиной 1-5 мм. Бумажно-слоистые пластики разнообразны по цвету и рисунку, хорошо обрабатываются – их можно пилить, сверлить. Пластик толщиной до 1,6 мм крепят битумно-каучуковыми и другими мастиками, эпоксидными и резорциноформальдегидными клеями. Более толстые листы пластика крепят механическим способом.

#### 11.4. Модификация строительных материалов полимерами

Одним из эффективных направлений улучшения свойств традиционных материалов – бетона, дерева, натурального камня, битума и пр. – считается обработка их полимерами. Модификацию строительных материалов полимерами осуществляют следующими приемами: введением полимеров в бетонную или растворную смесь при перемешивании; пропиткой полимерами готовых изделий; нанесением полимерных покрытий на поверхности; введением полимерных волокон и заполнителей.

*Материалы, модифицированные полимерами*, характеризуются повышением прочности при всех видах механического нагружения, но особенно при растяжении; улучшением деформативных характеристик, выражающихся в уменьшении жесткости, несколько большей предельной деформативностью; повышенным сопротивлением динамическим воздействиям; повышением химической стойкости, водостойкости и водонепроницаемости; уменьшением истираемости; повышением адгезии, т.е. способности сцепляться с другим материалом.

**Бетонополимеры** – это затвердевшие бетоны, пропитанные полимером. Бетоны имеют микротрещины, каверны, пустоты, которые понижают его прочностные характеристики, снижают водостойкость и т.п. Для пропитки бетонных изделий используют жидкие мономеры, полимеры

(эпоксидные и полиэфирные смолы) и различные композиции на их основе. Современная технология производства бетонополимерных изделий состоит из следующих операций: изготовление бетонных изделий обычным путем; высушивание при температуре 110 °С в течение 10-20 ч; вакуумирование бетона для удаления воздуха и паров воды из порового пространства; пропитка мономером под давлением; отверждение мономера в порах бетона. *Прочность* бетонополимера на сжатие повышается в 2-10 раз по сравнению с исходным бетоном. Прочность на растяжение увеличивается в 3-10 раз. Соответственно возрастает его прочность на изгиб. Увеличиваются стойкость бетонополимеров в агрессивных средах, их водонепроницаемость и морозостойкость. Однако многоступенчатость технологии и потребность в специальном оборудовании для пропитки и отверждения мономера повышают стоимость изделия, ограничивают их размеры.

В настоящее время разработан метод пропитки бетона в конструкции мономером – метилметакрилатом. При этом бетон просушивается до остаточной влажности 1-2 %, летучесть мономера снижается путем введения парафинов, и соответствующие отвердители полимеризуют композицию в течение нескольких часов. Этот метод успешно применен для восстановления железобетонных конструкций после аварийных ситуаций (например, Останкинской телебашни после пожара).

**Полимерцементный бетон** – это цементный бетон с полимерной добавкой 10-20 % от цементного вяжущего. От обычных цементных бетонов он отличается улучшенными свойствами за счет затвердевшего полимера, который, равномерно распределяясь в цементном камне, при достаточной концентрации создает дополнительную матричную основу – пространственную сетку.

В зависимости от вида минерального вяжущего различают полимерцементные, полимергипсовые и другие композиции (бетонные, растворные, в том числе сухие строительные смеси). *Полимерными добавками* служат различные высокомолекулярные органические соединения; наиболее распространенные из них – поливинилацетат (ПВА), латексы и другие полимеры в виде водоразбавляемых дисперсий.

Влияние полимерной добавки на прочность полимерцемента связано с *условиями твердения и видом полимера*. Например, присутствие ПВА придает полимерцементному бетону высокую прочность при растяжении и изгибе, что проявляется только при твердении в воздушно-сухих условиях (относительная влажность среды 40-50 %). В то же время прочность при сжатии полимерцементного бетона меньше, чем обычного бетона при твердении во влажных условиях (влажность 90-100 %). Такие же закономерности характерны и для полимерцементных бетонов с другими полимерными добавками.

*Усадка* полимерцементных бетонов с добавкой ПВА и латексов в несколько раз выше, чем у обычного бетона. Такое увеличение усадки связа-

но с процессом пленкообразования полимера. Пленка, обладая высокой адгезией к составляющим, стягивает скелет цементного камня и увеличивает тем самым общую усадку.

Полимерцементные бетоны имеют *повышенную стойкость* к действию морской воды и щелочей. Полимерцементные бетоны с ПВА удовлетворительно сохраняют свойства в маслах, керосине и других неполярных средах. По износостойкости полимерцементные бетоны превосходят цементный бетон в 15-20 раз.

**Бетоны с полимерными покрытиями.** Бетонные и железобетонные конструкции проницаемы для жидкостей и газов, находящихся под давлением, нестойки против многих химически агрессивных сред, обладают высоким водопоглощением, плохими диэлектрическими свойствами, имеют шероховатую поверхность. Для устранения этих недостатков на поверхности бетона устраивают защитные полимерные покрытия. К ним предъявляются следующие требования: высокое сцепление с поверхностью бетона; высокая прочность, эластичность и трещиностойкость, низкая проницаемость для агрессивных сред; долговечность и экономичность.

Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют покрытия на полимерной основе: лакокрасочные, мастичные, полимерцементные, пленочно-плиточные, листовые. Широкое применение за рубежом нашли эпоксидные составы для мостовых, аэродромных покрытий, что защищает проезжую часть от износа. При выборе полимерных материалов (полимерных покрытий), защищающих изделия и конструкции от воздействия различных эксплуатационных, часто агрессивных факторов (что является одним из самых эффективных применений этих материалов), необходимо учитывать химическую стойкость полимера, его термостабильность, природу защищаемой поверхности, сцепляемость (адгезию) покрытия с защищаемой поверхностью и другие свойства полимера. Для ориентировочного выбора вида или группы полимеров для использования в тех или иных строительных изделиях и конструкциях можно воспользоваться диаграммой, изображенной на рис.10.

**Модификация древесины.** Древесина мягких лиственных пород, модифицированная полимерами, приобретает улучшенные свойства. По своим физико-механическим показателям она не уступает твердым лиственным породам, а иногда и превосходит их. Модификация таких пород, как береза, ольха, осина и тополь, позволяет значительно увеличить ресурсы древесины за счет продления срока ее службы и улучшения ее физико-механических свойств. Паркет, изготовленный из модифицированной низкосортной древесины, не уступает по свойствам паркету из дуба и ясеня. Для модификации древесины применяются полимеры (фенолоформальдегидные, мочевиноформальдегидные, меламиноформальдегидные, кремнийорганические, фурановые, ненасыщенные полиэферы) и мономеры (стирол, метилметакрилат).

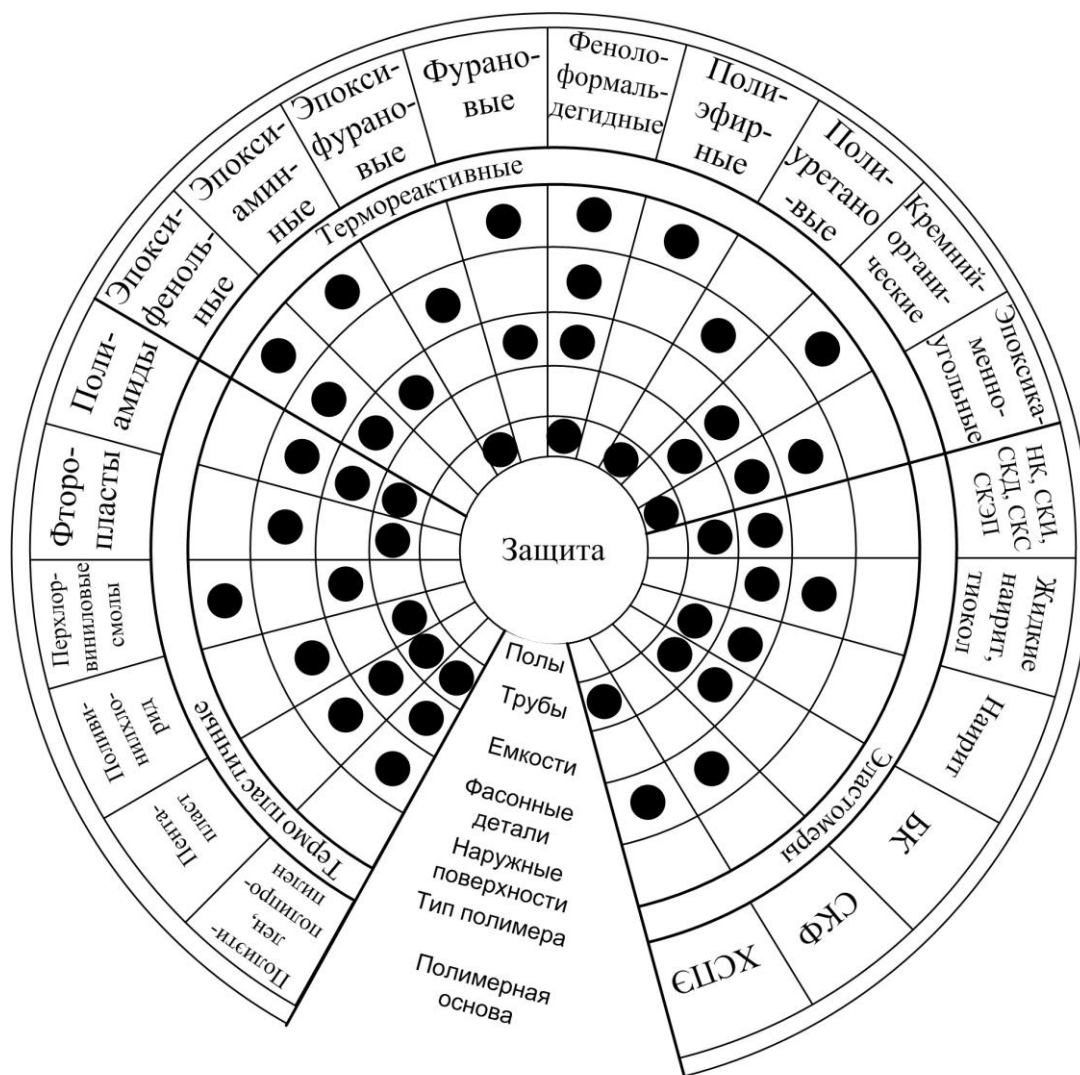


Рис. 10. Диаграмма ориентировочного выбора полимеров для использования в строительных изделиях и конструкциях (НК – натуральный каучук, СКИ – каучук синтетический изопреновый, СКД – каучук бутадиеновый, СКС – каучук бутадиенстирольный, СКЭП – каучук этиленпропиленовый, СКФ – каучук фторосодержащий, БК – бутилкаучук, ХСПЭ – хлорсульфированный полиэтилен)

Технология модификации древесины состоит из 2-х процессов: пропитки древесины олигомерами или мономерами и их отверждения. При этом предел прочности древесины при сжатии возрастает в несколько раз, ее истираемость снижается в 1,5-2 раза, водопоглощение снижается более чем вдвое.

Полимер, заполняющий полости клеток древесины, способствует повышению ее биохимической стойкости. Модифицированная древесина обладает повышенной стойкостью к действию агрессивных сред, что объяс-

няется замедленной диффузией агрессивных жидкостей внутрь древесины, а также повышенной химической стойкостью пропитывающих полимеров.

## **12. ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ И КРОВЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Гидроизоляционными и кровельными называют строительные материалы, которые должны обладать водонепроницаемостью, а также соответствовать определенным эксплуатационным требованиям по прочности, деформативности, теплостойкости, биостойкости и др.* Выпускаются многие виды штучных, рулонных, пленочных, мастичных и лакокрасочных гидроизоляционных и кровельных материалов на основе битумных и дегтевых вяжущих, а также полимеров.

Особым видом подобных материалов являются *герметизирующие или уплотняющие материалы (герметики)*. Герметики применяют для уплотнения швов между элементами сборных конструкций (панелями и блоками наружных стен и т.п.). Они должны обеспечить эластичность, необходимую для восприятия температурных и усадочных деформаций, и не допускать проникания влаги через швы.

Кровельные и гидроизоляционные материалы нормируются по показателям водонепроницаемости, водопоглощения, теплостойкости и гибкости при пониженных температурах, а также механической прочности. Повышение качества гидроизоляционных и кровельных материалов связано с использованием полимеров, а также битумных композиций, модифицированных полимерами.

### **12.1. Кровельные и гидроизоляционные материалы на основе битумов и дегтей**

**Рулонными** называются гидроизоляционные материалы или изделия, отгружаемые на строительные объекты или для выполнения ремонтных строительных работ в виде полотна определенной длины, ширины и толщины, смотанного в рулон-сверток цилиндрической формы.

Рулонные гидроизоляционные материалы изготовляют двух типов: 1) с основой – картоном, стеклохолстом, стеклотканью, полиэстером, металлической фольгой и 2) без основы (безосновные), но обычно с порошкообразным или волокнистым наполнителем. Широко применяются рулонные основные материалы и изделия. Наиболее дешевым вариантом основы является кровельный картон; более прочной и долговечной основой служит стеклохолст; еще более прочная основа – стеклоткань, кроме того, она более химически- и влагоустойчивая, температуростойкая и не подвержена гниению. Полиэстер имеет такую же прочность, как и стеклоткань, не гниет, позволяет добиваться максимального сцепления с битумным покрытием.

При изготовлении обоих типов рулонных материалов для пропитки или нанесения покровного слоя применяются битумные, дегтевые, битум-

но-полимерные и другие аналогичные органические вещества. Покровные и пропиточные массы придают гидроизоляционным материалам и изделиям водонепроницаемость и водостойкость. При картонной или иной основе эти свойства обеспечиваются за счет максимального заполнения пор основы пропиточной массой, а также нанесения на основу с одной или двух сторон слоев покровной массы. Последние, кроме того, защищают основу от атмосферных воздействий и механических повреждений. В безосновных гидроизоляционных материалах пропиточная масса имеет большее значение, так как она одновременно является вяжущим веществом и придает рулонному материалу необходимые механические свойства. В материалах с картонной основой пропитка массой также повышает прочность картона, иногда на 30 % и более.

Выпускаются как беспокровные (подкладочные), так и покровные рулонные гидроизоляционные материалы.

*Рубероид* изготавливают, пропитывая кровельный картон легкоплавким битумом с последующим покрытием с одной или обеих сторон тугоплавким нефтяным битумом с наполнителем и посыпкой: крупнозернистой (К), мелкозернистой (М) или пылевидной (П), а также чешуйчатой (Ч). Крупнозернистая цветная посыпка не только повышает атмосферостойкость рубероида, но и придает ему лучшие декоративные свойства. В зависимости от назначения (кровельный – К, подкладочный – П), вида посыпки и массы 1 м<sup>2</sup> основы (кровельного картона) рубероид делят на марки, например, РКК-500А, РКК-400А, РКК-400Б, РКК-400В, РКМ-350Б, РКМ-400В, РПМ-300А и др. На нижнюю поверхность кровельного рубероида, образующего верхний слой кровельного ковра, и на обе стороны подкладочного рубероида наносят мелкозернистую или пылевидную посыпку, предотвращающую слипание материала в рулонах. *Наплавляемый рубероид* – кровельный материал, наклейка которого осуществляется без применения кровельной мастики – расплавлением утолщенного нижнего покровного слоя (пламенем горелки или другим способом). В результате производительность труда повышается на 50 %, удешевляются кровельные работы, улучшаются условия труда.

*Пергамин* – рулонный беспокровный материал, получаемый пропиткой основы – кровельного картона расплавленным нефтяным битумом с температурой размягчения не ниже 40 °С. Служит подкладочным материалом под рубероид и используется для пароизоляции.

Долговечность гидроизоляционных и кровельных материалов повышают, используя более прочную и стойкую основу, чем кровельный картон, из асбестового и стекловолокна.

*Гидроизол* – рулонный беспокровный гидроизоляционный материал, полученный путем пропитки асбестового картона нефтяным битумом. Он предназначается для устройства гидроизоляционного слоя в подземных и



гидротехнических сооружениях, а также для защитного противокоррозионного покрытия.

*Стеклорубероид* – рулонный материал, получаемый путем двустороннего нанесения битумного (битумно-резинового или битумно-полимерного) вяжущего на стекловолокнистую основу и покрытия с одной или двух сторон сплошным слоем посыпки. В зависимости от вида посыпки и назначения стеклорубероид выпускают следующих марок: С-РК (с крупнозернистой посыпкой), С-РЧ (с чешуйчатой посыпкой) и С-РМ (с пылевидной и мелкозернистой посыпкой). Применяют стеклорубероид для верхнего и нижних слоев кровельного ковра и оклеечной гидроизоляции.

В настоящее время снижается объем производства рубероида, и его заменяют новыми рулонными материалами – наплавленными битумно-полимерными и комбинированными. В них в качестве основы используются стеклохолсты, стеклоткани, нетканые синтетические и другие материалы. При использовании битумов они модифицируются полимерными веществами. Расширяется производство и безосновных рулонных материалов с применением в них кроме битума бутилкаучука и некоторых других полимеров.

С применением *битумов, модифицированных полимерами*, и *битумно-полимерных вяжущих*, а также биостойкой основы из стеклоткани в настоящее время выпускается много материалов с улучшенными свойствами (прежде всего эластичностью и гибкостью при низких температурах, что во многом определяет их большую долговечность) и разными фирменными названиями, например, «Рубемаст», «Стеклобит», «Стекломаст», «Эластобит», «Элабит», «Линокром», «Филизол», «Изопласт», «Бикрост» и др. Сегодня на мировом рынке представлены два основных класса кровельных битумно-полимерных материалов – модифицированные атактическим полипропиленом (АПП) и стирол-бутадиен-стирольным каучуком (СБС). Первые отличаются высокой теплостойкостью, неплохой гибкостью на холоде (до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), высокой устойчивостью к атмосферным воздействиям и ультрафиолетовому излучению. Вторые – повышенной гибкостью на холоде (до  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), но большей чувствительностью к ультрафиолетовому излучению. Все это позволяет уменьшить количество слоев в кровельном покрытии по сравнению с обычным рубероидом (1-2 слоя вместо 5-7 слоев) и значительно увеличить срок его службы.

Выпускаются материалы на основе металлической фольги, которые обладают повышенной газо- и водонепроницаемостью. *Фольгоизол* – рулонный двухслойный материал, состоящий из тонкой рифленой или гладкой алюминиевой фольги, покрытой с нижней стороны защитным битумно-резиновым составом. Он предназначен для устройства кровель и паро-гидроизоляции зданий и сооружений, герметизации стыков. Внешняя поверхность фольгоизола может быть окрашена в различные цвета атмосферостойкими лаками.

*Металлоизол* – гидроизоляционный материал из алюминиевой фольги, покрытой с обеих сторон битумной мастикой. Металлоизол выпускают двух марок, отличающихся толщиной алюминиевой фольги. Он имеет высокую прочность на разрыв и долговечен. Применяют металлоизол для гидроизоляции подземных и гидротехнических сооружений.

Применяют безосновные рулонные материалы. *Бризол* изготавливают, прокатывая массу, полученную смешиванием нефтяного битума, дробленой резины (от изношенных автопокрышек), асбестового волокна и пластификатора. Бризол стоек к воде и некоторым агрессивным средам. Его применяют для защиты от коррозии подземных металлических конструкций и трубопроводов.

*Изол* – безосновный рулонный гидроизоляционный и кровельный материал, изготавливаемый прокаткой резинобитумной композиции, полученной термомеханической обработкой девулканизированной резины, нефтяного битума, минерального наполнителя, антисептика и пластификатора. Изол эластичен, биостоек, незначительно поглощает влагу. Изол применяют для гидроизоляции гидротехнических сооружений, бассейнов, резервуаров, подвалов, антикоррозионной защиты трубопроводов, для покрытия двух- и трехслойных пологих и плоских кровель.

**Штучные кровельные изделия.** В современном строительстве для улучшения декоративных свойств крыш широко применяют мягкую цветную черепицу. Еще с первой половины XX века известна плитка "Шинглс" от англ. «shingle» (другие названия – черепица, гонт), получаемая вырубкой из рубероида отдельных кровельных плиток, посыпанных цветной каменной крошкой, которые укладывают на кровлю аналогично кровельному сланцу или шиферу. Современная мягкая черепица – это листы из кровельного картона, стеклоткани, полиэстера, пропитанные битумом и покрытые цветной минеральной крошкой.

**Мастики** представляют собой смесь нефтяного битума или дегтя (отогнанного или составленного) с минеральным наполнителем. Для получения мастик применяют пылевидные (измельченный известняк, доломит, мел, цемент, зола твердых видов топлива) и волокнистые наполнители (асбест, минеральная вата и др.). Наполнители адсорбируют на своей поверхности масла, при этом повышается теплостойкость и твердость мастики. Кроме того, уменьшается расход битума или дегтя; волокнистые наполнители, армируя материал, увеличивают его сопротивление изгибу.

Мастики подразделяют: по *виду связующего* – на битумные, битумно-резиновые, битумно-полимерные; по *назначению* – приклеивающие, кровельно-изоляционные, гидроизоляционные (асфальтовые) и герметизирующие, а также антикоррозионные. Кроме того, по *способу применения* мастики бывают горячие, применяемые с предварительным подогревом (до 160 °С для битумных мастик и до 130 °С для дегтевых мастик), и холодные, содержащие растворитель, используемые без подогрева при темпера-

туре воздуха не ниже 5 °С и с подогревом до 60-70 °С при температуре воздуха ниже 5 °С. В качестве растворителей для получения холодных мастик применяют как летучие (бензин, лигроин, керосин), так и нелетучие (соляровое масло, мазут, нефти) растворители.

*Приклеивающие* мастики применяют для склеивания рулонных материалов при устройстве многослойных кровельных покрытий и оклеечной гидроизоляции. Марку приклеивающей мастики устанавливают по показателю теплостойкости. Выбор марки мастики производят в зависимости от максимальной температуры воздуха и уклона кровли.

*Кровельно-гидроизоляционные* мастики применяют для устройства безрулонных кровель, гидроизоляции, в качестве приклеивающего материала. Такие мастики обладают повышенной эластичностью, гибкостью, морозостойкостью.

*Гидроизоляционные асфальтовые* мастики применяют для заливочной гидроизоляции швов гидротехнических сооружений.

*Антикоррозионные битумные* мастики служат для защиты строительных конструкций и трубопроводов от агрессивных воздействий. Применяют для защиты от действия разбавленных растворов кислот и щелочей, оксидов азота, сернистого газа, аммиака и паров кислот при температуре до 60 °С. Битумно-резиновые мастики для изоляции подземных стальных трубопроводов применяют как в горячем, так и в холодном состоянии – с растворителем. Битумно-полимерные мастики содержат добавку каучука или синтетической смолы, придающей эластичность на морозе и теплостойкость.

**Эмульсии и пасты.** Битумные и дегтевые эмульсии представляют собой дисперсные системы, в которых в воде как дисперсионной среде (разбавителе) в виде частиц размером около 1 мкм диспергированы битум или деготь. Устойчивость эмульсии обеспечивается путем введения в нее эмульгаторов – поверхностно-активных веществ, уменьшающих поверхностное натяжение на поверхности раздела «битум (деготь) - вода». Эмульгаторами служат мыла (нафтенных, сульфонафтенных, смоляных органических кислот), лигносульфонаты технические. К твердым эмульгаторам относятся тонкие порошки глин, извести, цемента, каменного угля, сажи. Твердые эмульгаторы, как и жидкие, адсорбируются на поверхности частиц (глобул) битума или дегтя, образуя защитный слой, препятствующий слипанию частиц. Эмульсии готовят в специальных машинах – диспергаторах, гомогенизаторах, установках с использованием ультразвуковых колебаний и т.п. Приготовление эмульсии включает: разогрев битума (дегтя) до 50-120 °С, приготовление эмульгатора, диспергирование вяжущего в воде с добавлением водного раствора эмульгатора. Содержание битума (дегтя) в обычных эмульсиях 50-60 %, в пастах – 60-70 %. Количество жидких эмульгаторов в эмульсии обычно не превышает 3 %, твердых

эмульгаторов – 5-15 % в зависимости от вида эмульгатора и дисперсности битумной (дегтевой) фазы.

*Пасты*, являющиеся высококонцентрированными эмульсиями и исходными эмульсиями с твердыми эмульгаторами, разбавляют водой до получения эмульсий нужной вязкости.

Эмульсии применяют для грунтовки основания под гидроизоляцию, приклеивания рулонных и штучных битумных и дегтевых материалов, для устройства гидро- и пароизоляционных покрытий и в качестве вяжущего вещества при изготовлении асфальтовых (дегтевых) растворов и бетонов. При взаимодействии эмульсии с каменным материалом (щебнем и песком) происходит ее распад вследствие адсорбции эмульгатора, поглощения и испарения воды; при этом битум (деготь) обволакивает и связывает между собой зерна заполнителя.

**Лакокрасочные покрытия.** Битумно-смоляные лаки представляют собой растворы битумов и органических масел в органических растворителях. При добавлении алюминиевой пудры получают теплостойкую краску, применяемую для окраски санитарно-технического оборудования.

## **12.2. Кровельные и гидроизоляционные материалы на основе полимеров**

**Гидроизоляционные пленочные (рулонные) материалы** изготавливают экструзией, механическим или пневматическим вытягиванием из поливинилхлорида, полиэтилена, пропилена, ацетилцеллюлозы, синтетического каучука и других полимеров. Толщина пленочных материалов зависит от их назначения. Для устройства противофильтрационных завес используют полиэтиленовую пленку толщиной 0,2 мм (200 мкм); гидроизоляцию туннелей и других сооружений против действия агрессивных вод выполняют из поливинилхлоридной или полиэтиленовой пленок толщиной 1,5-2 мм.

*Полиэтиленовые* пленки обладают стойкостью против действия природных вод, нейтральных солевых, щелочных и кислотных растворов с содержанием этих веществ до 5 %. Повышение механической прочности пленки осуществляется армированием стеклотканью, синтетическими волокнами и соединением с бумажной или тканевой подосновой.

*Полипропиленовые* пленки имеют более высокие физико-механические свойства. Предел прочности их при растяжении 25-30 МПа; водопоглощение за 24 ч 1,5 %; их эластичность сохраняется до -20 °С.

*Поливинилхлоридные* пленки имеют относительное удлинение при разрыве 100-300 %; водопоглощение за 24 ч 0,15-0,2 %. Стареют они быстрее; поэтому применять эти пленки лучше в закрытых конструкциях, куда не попадают солнечные лучи.

*Полимерные мембраны* – особый класс пленочных материалов из синтетических каучуков, термопластичных полиолефинов, эластичного поли-

винилхлорида. Отличительной особенностью этих материалов является большая ширина пленок. Благодаря этому можно свести количество швов к минимуму. Эти материалы характеризуются высокой прочностью, эластичностью, высокой атмосферостойкостью, стойкостью к окислению и воздействию ультрафиолетовых лучей, а также морозостойкостью. Кровельные мембраны долговечнее других известных материалов для мягких кровель. Полимерные мембраны, как правило, на 20-30 % дороже битумно-полимерных материалов, но срок службы у них значительно больше. Так, ведущие производители кровельных мембран дают им гарантию на 10-20 лет, а прогнозируемый срок безремонтной службы полимерной кровли – до 50 лет (при точном соблюдении технологии).

**Кровельные штучные изделия.** *Волнистые и плоские листы из стеклопластиков на полиэфирных полимерах* имеют толщину 0,8-1,5 мм, предел прочности при растяжении 220-230 МПа, а при изгибе – 350 – 400 МПа. Кровля из стеклопластиков легкая, прочная, красивая и прозрачная, пропускает много естественного света, однако следует учитывать ее горючесть.

*Сотовый поликарбонат* – материал, получаемый методом экструзии из гранул поликарбоната. Выпускается в виде прозрачных ячеистых панелей различной толщины и оттенков. Поликарбонат обладает хорошей теплоизоляцией. Он легко и без предварительной обработки поддается изгибу, не ломается при сверлении и резке, что позволяет применять его как конструкционный материал.

Небольшая плотность материала дает возможность заметно снизить расходы на транспортировку и монтаж сделанных из него конструкций. Высокая устойчивость к воздействию ультрафиолетовых лучей и большинству химических веществ, к атмосферным осадкам и резким перепадам температур (в диапазоне от -40 до 120 °С) позволяет использовать сотовый поликарбонат во многих элементах конструкций, в отделке фасадов и интерьеров.

Среди прочих характеристик этого полимерного материала можно выделить ударопрочность и трудновоспламеняемость. Еще одно положительное свойство – звукоизоляционные качества и высокая светопроницаемость (до 90 %). Последнее очень важно при строительстве крыш, козырьков, световых проемов.

**Мастичные кровельные покрытия** получают при нанесении на бетонное основание жидковязких олигомерных продуктов, которые, отверждаясь на воздухе, образуют сплошную эластичную пленку. Эти покрытия – полимерные мембраны, формируемые прямо на поверхности крыши.

В качестве **герметиков** на основе полимеров выпускают герметизирующие мастики (нетвердеющие и твердеющие) и эластичные уплотняющие прокладки. *Герметизирующую твердеющую* мастику наносят в пластичном состоянии специальным инструментом, который может иметь

сменные наконечники, приспособленные к конфигурации шва. Поэтому мастика хорошо заполняет не только сам шов, но и места пересечений вертикальных и горизонтальных швов, являющиеся уязвимым местом сборной конструкции. Мастика хорошо прилипает к бетону и сохраняет адгезию к бетону при положительных (до 60 °С) и отрицательных температурах. Широко применяют мастики на основе полисульфидных каучуков-тиоколов и резинобитумного вяжущего. Тиоколовые мастики готовят перед началом работ путем тщательного смешения тиоколовой пасты, вулканизирующей добавки, ускорителя вулканизации и разжижителя. В результате процесса вулканизации смесь отвердевает непосредственно в шве, и получается эластичный, резиноподобный уплотнитель черного цвета.

*Эластичные прокладки* имеют вид пористых или плотных жгутов на основе резины, полиуретана, синтетических каучуков. Для герметизации швов применяют прокладки сплошного и полого сечения. Внутри полой прокладки можно создать разрежение; такую прокладку устанавливают в шов, конец ее обрезают, и воздух, заполняя полость прокладки, плотно прижимает ее стенки к кромкам панели, что обеспечивает хорошую герметизацию шва.

### 13. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

#### 13.1. Классификация и основные требования

*Теплоизоляционными называют материалы, имеющие теплопроводность не более 0,175 Вт/(м · °С) при 25 °С и предназначенные для снижения тепловых потоков в зданиях, технологическом оборудовании, трубопроводах, тепловых и холодильных промышленных установках.* Применение таких материалов в конструкциях позволяет весьма существенно экономить тепловую энергию, дефицитность и стоимость которой постоянно растут.

Теплоизоляционные материалы и изделия классифицируют:

*по виду основного исходного сырья* (неорганические и органические);

*структуре* (волокнистые, ячеистые, зернистые, сыпучие);

*форме* – рыхлые (вата, перлит), плоские (плиты, маты, войлок), фасонные (цилиндры, полуцилиндры, сегменты и др.) и шнуровые (шнуры, жгуты);

*сжимаемости* – мягкие (М), имеющие относительную деформацию свыше 30 % при удельной нагрузке 2 кПа; полужесткие (ПЖ) – соответственно 6-30 %; жесткие (Ж) – не более 6 %. Кроме того, различают изделия повышенной жесткости, имеющие относительную деформацию до 10 % при удельной нагрузке 4 кПа, и твердые – до 10 % при удельной нагрузке 10 кПа;

*возгораемости (горючести)* – негорючие, трудногорючие и сгораемые.

Тепловой поток через пористые строительные материалы представляет собой сумму кондукционного (теплопередача)  $\lambda_t$ , конвекционного  $\lambda_k$  и радиационного (излучение)  $\lambda_p$  потоков. Чем мельче поры и чем их больше, тем меньше теплопроводность изделия (рис. 11). Стремление к замкнутой пористости отличает структуру теплоизоляционных материалов от структуры звукопоглощающих, которые должны иметь определенное количество открытых пор. Это принципиальное отличие необходимо иметь в виду, так как часто для производства теплоизоляционных и звукопоглощающих изделий используются одни и те же исходные материалы. Минимальную теплопроводность имеет сухой воздух, заключенный в мелких замкнутых порах, в которых практически невозможен конвективный теплообмен, а именно  $0,023 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$ . Теплопроводность скелета материала с аморфной структурой существенно ниже, чем с кристаллической. Таким образом, структура теплоизоляционного материала и изделия должна иметь скелет аморфного строения, предельно насыщенный мелкими замкнутыми порами или тонкими воздушными слоями.

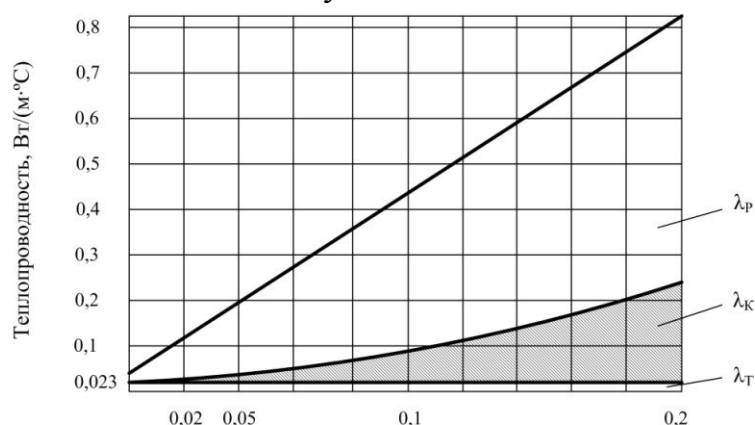


Рис.11. Зависимость теплопроводности от толщины воздушных прослоек

Для теплопроводности имеют огромное значение *влажность* материала, так как теплопроводность воды равна  $0,58 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$ , что в 25 раз выше, чем теплопроводность сухого воздуха, содержащегося в мелких замкнутых порах материала.

В случае *замерзания* воды в порах теплопроводность льда составит  $2,32 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$ , что на два порядка выше значения теплопроводности сухого воздуха и в 4 раза больше теплопроводности воды.

На практике используют различные *способы создания высокопористого строения* материала. Для получения материалов *ячеистого строения* (ячеистые бетоны, пеностекло, пористые пластмассы) используют способы газовыделения и пенообразования.

Способ *высокого водозатворения* состоит в применении большого количества воды при получении формовочных масс (например, из трепела, диатомита); последующее испарение воды при сушке и обжиге формовочных изделий способствует образованию воздушных пор. Этот способ часто

сочетается с введением выгорающих добавок (углесодержащих техногенных отходов, древесных опилок и др.).

Создание *волокнутого каркаса* – основной способ образования пористости у таких материалов, как минеральная вата и изделия из нее, древесноволокнистые плиты и т.п.

Высокопористое строение закрепляется путем затвердевания или отверждения (соответственно у неорганических и органических материалов).

**Теплопроводность** – основной качественный показатель теплоизоляционных материалов. По этому показателю они делятся на три класса: класс А – малотеплопроводные – до 0,058 Вт/(м · °С); класс Б – среднетеплопроводные – 0,058-0,116 Вт/(м · °С) и класс В – повышенной теплопроводности – не более 0,18 Вт/(м · °С).

Толщину однородной ограждающей конструкции в зависимости от ее требуемого термического сопротивления и теплопроводности материала определяют по формуле

$$\delta = R_t \cdot \lambda ,$$

где  $\delta$  – толщина конструкции, м;  $R_t$  – термическое сопротивление, (м · °С)/Вт;  $\lambda$  – теплопроводность материала, Вт/(м · °С).

Теплопроводность материала связана с его *плотностью* (рис. 12).

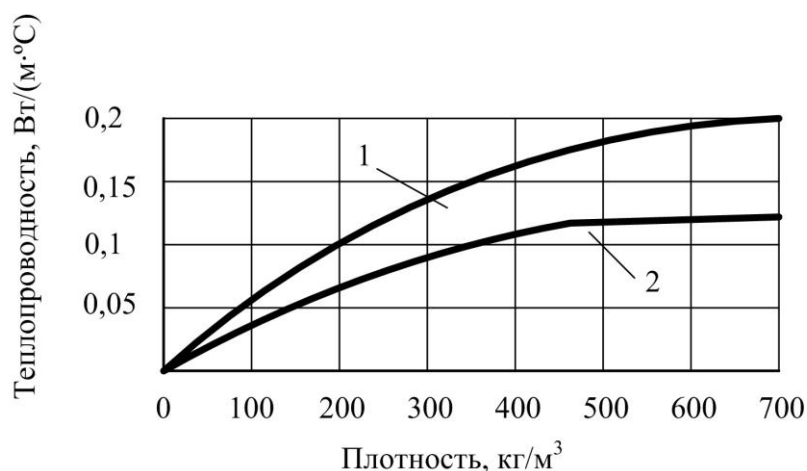


Рис. 12. Зависимость теплопроводности теплоизоляционных материалов от плотности:  
1 – неорганические материалы; 2 – органические материалы

В настоящее время нормативные требования к энергозащите вновь строящихся и эксплуатируемых зданий значительно повышены. Только высокоэффективные теплоизоляционные материалы плотностью менее 200 кг/м³ и теплопроводностью не выше 0,06 Вт/(м · °С) способны обеспечить достаточное снижение энергопотерь в строительстве.

**Прочность** теплоизоляционных материалов при сжатии сравнительно невелика – 0,2-2,5 МПа. Основной прочностной характеристикой волокнистых материалов (плит, скорлуп, сегментов) является предел прочности при изгибе. У неорганических материалов он составляет 0,15-0,5 МПа; у древесных плит – 0,4-2 МПа. Гибкие теплоизоляционные материалы (ми-



нераловатные маты, войлок) испытывают на растяжение. Прочность материала должна обеспечивать его сохранность при перевозке, складировании, монтаже и, конечно, в эксплуатационных условиях.

*Деформативные свойства* теплоизоляционных материалов характеризуются сжимаемостью (в виде относительной деформации в процентах) и гибкостью.

*Водопоглощение* не только ухудшает теплоизоляционные свойства пористого материала, но также понижает его прочность и долговечность. Материалы с закрытыми порами, например, пеностекло, отличаются небольшим водопоглощением. Для снижения водопоглощения при изготовлении материалов с большой открытой пористостью вводят гидрофобизирующие добавки.

*Газо- и паропроницаемость* учитывают при применении теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях. С одной стороны, теплоизоляция не должна препятствовать воздухообмену жилых помещений с окружающей средой, происходящему через наружные стены зданий. С другой стороны, теплоизоляцию стен защищают от увлажнения с помощью гидроизоляции, устраиваемой с «теплой» стороны.

*Огнестойкость* связана со сгораемостью материала, т.е. его способностью воспламеняться и гореть. Сгораемые материалы можно применять только при осуществлении мероприятий по защите от возгорания. Возгораемость материалов определяется при воздействии температуры 800-850 °С и выдержке в течение 20 мин. Предельная температура применения не должна изменять эксплуатационные свойства материала.

*Химическая и биологическая стойкость* пористых теплоизоляционных материалов должна препятствовать проникновению в них агрессивных газов и паров, находящихся в окружающей среде. Органические теплоизоляционные материалы и связующие (клей, крахмал) должны обладать биологической стойкостью, т.е. сопротивляться действию микроорганизмов, домовых грибов, насекомых (муравьев, термитов).

### **13.2. Неорганические теплоизоляционные материалы и изделия**

**Минераловатные изделия.** *Минеральная вата* – волокнистый бесформенный материал, состоящий из тонких стекловидных волокон диаметром 5-15 мкм, которые получают из расплава легкоплавких горных пород (мергелей, доломитов, базальтов и др.), металлургических и топливных шлаков и их смесей. Наилучшим видом минерального волокна является *базальтовое волокно*, которое выдерживает температуру до 1000 °С, обладает стойкостью к коррозии. Широко используются стеклянные волокна. Минераловатные изделия на основе указанных волокон различаются как по структуре и внешнему виду (плиты, маты, скорлупы и т.д.), так и по эксплуатационным свойствам (прочности, сжимаемости, теплопроводности, стойкости и др.).

*Маты* в рулонах выпускают с синтетическим связующим (плотность 35-75 кг/м<sup>3</sup>); прошивные с металлическими, тканевыми, бумажными обкладками, а также с обкладкой из стеклохолста (100-200 кг/м<sup>3</sup>); из штапельного стекловолокна (25-50 кг/м<sup>3</sup>); из непрерывного стекловолокна (80-120 кг/м<sup>3</sup>); в виде холста из базальтового волокна (15-20 кг/м<sup>3</sup>). *Прошивные маты* – это гибкие изделия из слоя прошитого волокнистого материала. Последнее время используются вертикально-слоистые гибкие маты, состоящие из приклеенных к покровному материалу полос волокнистых плит при преимущественно перпендикулярном расположении волокон. Гибкие изделия, состоящие из слоя волокнистого материала со связующим веществом, называются *войлоком*.

*Полужесткие и мягкие плиты* изготавливают с синтетическим, битумным и крахмальным связующим. Изделия (плиты, маты) с синтетическим связующим имеют меньшую плотность, более прочны и привлекательны на вид по сравнению с изделиями на битумном связующем. Плотность плит 35-250 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность 0,041-0,07 Вт/(м · °С). *Жесткие плиты и фасонные изделия* (скорлупы, сегменты) выпускают с синтетическим, битумным и неорганическим связующим (цементом, глиной, жидким стеклом и др.). Для повышения прочности и снижения количества связующего в состав изделий вводят коротковолокнистый асбест. Плиты толщиной 40-100 мм выпускают плотностью 100-300 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводностью 0,051-0,135 Вт/(м · °С). *Твердые плиты*, имеющие пониженную сжимаемость, изготавливают на синтетическом связующем (фенолоспирте, растворе или дисперсии карбамидного полимера и др.). Прочность на сжатие минераловатных изделий повышается с ростом количества вертикально ориентированных волокон. Прочность на сжатие при 10 %-ной деформации в 100 кПа может быть достигнута для минераловатных плит плотностью 150-160 кг/м<sup>3</sup> при содержании вертикально ориентированных волокон около 65 %; для плит плотностью 180-190 кг/м<sup>3</sup> – около 55 %. Минераловатные изделия с гофрированной структурой, содержащие до 30 % ориентированных в вертикальном направлении волокон, имеют плотность 140-200 кг/м<sup>3</sup>. По сравнению с плитами с горизонтальной ориентацией волокон гофрированные плиты отличаются меньшей деформативностью и повышенной в 1,7-2,5 раза прочностью.

**Керамические теплоизоляторы** изготавливают путем формования, сушки и обжига глинистого и другого минерального сырья (диатомит, трепел, огнеупорная глина, перлит). По сравнению с другими теплоизоляционными материалами они имеют высокую прочность и температуру применения (до 900 °С). Большая пористость создается путем введения в формовочную массу газообразователей, выгорающих добавок.

**Ячеистое стекло (пеностекло)** вырабатывают из стекольного боя, либо используют те же сырьевые материалы, что и для производства других видов стекла: кварцевый песок, известняк, соду и сульфат натрия. При

спекании порошка стекольного боя с газообразователями – коксом и известняком – выделяется углекислый газ, образующий поры. Газообразующими добавками могут служить также мел или карбиды кальция и кремния. Ячеистое стекло имеет в материале стенок крупных пор мельчайшие микропоры, обуславливающие малую теплопроводность при достаточно высоких прочности, водостойкости и морозостойкости. Ячеистое стекло – несгораемый, экологически чистый материал с достаточно высокой температуростойкостью (для щелочного – 400 °С, для бесщелочного – до 600 °С); хорошо обрабатывается. Применяют для теплоизоляции стен зданий, тепловых сетей при их подземной бесканальной прокладке, для теплоизоляции стен, перекрытий, кровель, в конструкциях холодильников.

**Вулканитовые изделия** изготавливают из смеси молотого диатомита или трепела (около 60 %), воздушной извести (20 %) и асбеста (20 %). Отформованные изделия подвергают автоклавной обработке, которая ускоряет химическое взаимодействие между кремнеземистым компонентом и воздушной известью, приводящее к образованию гидросиликатов кальция.

**Теплоизоляционные бетоны.** *Крупнопористые* легкие бетоны готовят на основе пористого заполнителя – вспученного перлита, легкого керамзита или вермикулита и минерального вяжущего. Их плотность может составлять 150-300 кг/м<sup>3</sup>. *Теплоизоляционные ячеистые* бетоны (газо- и пенобетоны) получают плотностью от 150 до 500 кг/м<sup>3</sup>. Эти бетоны имеют низкую теплопроводность, достаточную марку по прочности, сравнительно низкое водопоглощение. Они морозостойки, обладают хорошей гвоздистостью, огнестойкостью. Теплоизоляционные бетоны используют для утепления наружных ограждений как в виде сборных плит, так и в качестве монолита.

**Зернистые материалы (теплоизоляционные засыпки).** В виде пористого песка с насыпной плотностью 50-120 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводностью 0,04-0,075 Вт/(м · °С) при температуре до 900 °С применяют *вспученный перлит и вспученный вермикулит* (предельная температура применения 1100 °С), *измельченные диатомиты и трепелы* (насыпная плотность 400-700 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводность 0,11-0,18 Вт/(м · °С)). При температурах до 450-600 °С применяют гранулированную и стеклянную вату, дробленую пемзу и вулканический туф, топливные шлаки, получаемые при сжигании кускового топлива, топливные золы от сжигания пылевидного топлива, доменные гранулированные шлаки.

**Стеклопор** получают путем грануляции и вспучивания жидкого стекла с минеральными добавками (мелом, молотым песком, золой ТЭС и др.). Технологический процесс включает производство гранулята – стеклобисера и его низкотемпературное (при 320-360 °С) вспучивание. Стеклопор выпускают трех марок: СЛ (насыпная плотность 5-40 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводность 0,028-0,035 Вт/(м · °С); Л (соответственно 40-80 кг/м<sup>3</sup> и 0,032-0,04 Вт/(м · °С); Т (соответственно 80-120 кг/м<sup>3</sup> и 0,038-0,05 Вт/(м · °С). В

сочетании с различными связующими стеклопор используют для изготовления штучной, мастичной и заливочной теплоизоляции. Наиболее эффективно введение стеклопора в наполненные пенопласты, так как позволяет снизить расход полимера и значительно повысить их теплостойкость.

### 13.3. Органические теплоизоляционные материалы и изделия

**Материалы на основе органического сырья природного происхождения.** *Фибролит* – плитный материал из древесной шерсти и неорганического вяжущего вещества. Древесную шерсть (стружку длиной 200-500, шириной 2-5 и толщиной 0,3-0,5 мм) получают на специальных станках, используя короткие бревна ели, липы, осины или сосны. Вяжущими чаще всего служат портландцемент (цементный фибролит) и магнезиальное вяжущее (магнезиальный фибролит). Формы с массой последовательно проходят камеру начеса, прессовочный вал, пост разделки на плиты, камеру твердения и сушки. Плиты выпускают плотностью 300-500 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводностью 0,1- 0,15 Вт/(м · °С), с пределом прочности при изгибе 0,4-1,2 МПа. Плиты применяют для теплоизоляции ограждающих конструкций, устройства перегородок, каркасных стен и перекрытий в сухих условиях. Фибролит хорошо обрабатывается – его можно пилить, сверлить, в него можно вбивать гвозди.

*Теплоизоляционные бетоны на основе органических заполнителей* (арболит, опилкобетон, костробетон, полистиролбетон и т.п.) изготавливают на основе минерального вяжущего и легкого органического заполнителя (древесных опилок, дробленой станочной стружки или щепы, сечки соломы или камыша, костры, вспученных полистирольных гранул и др.). Теплоизоляционные бетоны имеют плотность до 500 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии 0,5-3,5 МПа, предел прочности при изгибе 0,4-1,0 МПа; теплопроводность 0,08-0,12 Вт/(м · °С).

*Древесноволокнистые плиты* изготавливают путем горячего прессования массы, содержащей около 90 % органического волокнистого сырья (чаще всего применяют специально приготовленную древесную шерсть) и 7-9 % синтетических смол (фенолоформальдегидных и др.). Для улучшения свойств плит в сырьевую массу добавляют гидрофобизирующие вещества, антисептики и антипирены. Древесноволокнистые плиты производят из неделовой древесины, используют отходы лесопиления и деревообработки, а также бумажную макулатуру, солому, стебли кукурузы. Плотность древесноволокнистых теплоизоляционных плит – до 250 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность – до 0,07 Вт/(м · °С).

На основе растительного сырья готовят ряд местных материалов: *камышит, соломит, торфяные изоляционные плиты* и др.

Одним из перспективных направлений в производстве современных теплоизоляционных материалов является использование вторичного сырья, в том числе бытовых отходов (бумаги и картона). При этом получают

*эковату*, которая является по теплоизоляционным свойствам аналогом традиционных утеплителей: минеральной ваты, стекловаты и т.д. Среднее значение теплопроводности эковаты составляет  $0,041 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$ . Эковата трудно сгораема, что обусловлено добавками антипиренов, биостойкая, обладает звукопоглощающими свойствами.

*Сотопласты* изготавливают путем склейки гофрированных листов бумаги, стеклянной или хлопчатобумажной ткани, пропитанных полимером. Они служат эффективным утеплителем в трехслойных панелях.

**Ячеистые пластмассы** подразделяются в зависимости от характера пор на пенопласты и поропласты. *Пенопласты* имеют преимущественно закрытые поры в виде ячеек, разделенных тонкими перегородками. К *поропластам* относятся ячеистые пластмассы с сообщающимися порами. Имеются материалы со смешанной структурой. В ячеистых пластмассах поры занимают 90-98 % объема материала, поэтому ячеистые пластмассы очень легкие и малотеплопроводны. Их плотность составляет всего  $15\text{-}45 \text{ кг/м}^3$ , а теплопроводность –  $0,026\text{-}0,058 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$ .

*Пенополиуретан* получают в результате химических реакций, протекающих при смешении исходных компонентов (полиэфира, диизоцианита, воды, катализаторов и эмульгаторов). Изготавливают жесткий и эластичный полиуретан. Плотность  $25\text{-}45 \text{ кг/м}^3$ , прочность при 10 %-ном сжатии –  $0,3\text{-}0,7 \text{ МПа}$ . Жесткий пенополиуретан отличается высокой механической прочностью, устойчивостью к износу и химической и биологической стойкостью. Может быть использован при температуре от  $-50^\circ\text{С}$  до  $+110^\circ\text{С}$ . Жесткий пенополиуретан применяют в виде плит и скорлуп. Эластичный пенополиуретан служит для герметизации стыков панелей. Разработаны рецептуры заливочных композиций, которые могут вспениваться даже на холоде. По огнестойкости относится к самозатухающим материалам.

*Пенополистирол* изготавливается из полистирола с порообразователем. Беспоресовый пенополистирол (ПСБ) имеет плотность  $20\text{-}40 \text{ кг/м}^3$  и теплопроводность  $0,035\text{-}0,04 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$ . Его водопоглощение может достигать относительно больших значений, что ухудшает теплоизоляционные и физико-механические свойства и ограничивает срок службы этого материала (около 10 лет в Московском регионе). Более эффективный материал – *экструзионный пенополистирол* (ЭППС) – практически не впитывает влагу, и поэтому его теплотехнические свойства не ухудшаются при эксплуатации. Его плотность находится в пределах от 30 до  $50 \text{ кг/м}^3$ , а теплопроводность составляет  $0,03\text{-}0,035 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$ .

*Пенополивинилхлорид* – теплоизоляционный материал, незначительно изменяющий свои свойства при изменении температуры от  $-60$  до  $+60^\circ\text{С}$ . Он менее горюч по сравнению с пенополистиролом.

*Вспененный полиэтилен* («Пленэкс», «Изолон» и др.) применяют для тепловой изоляции трубопроводов и технологического оборудования при

температуре до от  $-40$  до  $+100$  °С. Наличие в этих материалах антипиренов делает их трудногорючими.

Органические теплоизоляционные материалы, и прежде всего ячеистые пластмассы, а также минераловатные изделия благодаря их высоким теплоизоляционным свойствам и чрезвычайно малой плотности относят к эффективным утеплителям. При этом они отличаются низкой удельной стоимостью. Так, теплоизоляционный слой пенопласта толщиной 5-6 см эквивалентен по теплозащите слою 14-16 см из ячеистого бетона или кладке толщиной 100-150 см из обычного кирпича. В то же время особенностью органических теплоизоляционных материалов, и прежде всего ячеистых пластмасс, является их ограниченная теплостойкость (для последних – от  $60$  до  $130$  °С в зависимости от вида пластмассы). Большинство из них горючи, а при горении они образуют множество летучих высокотоксичных соединений. Кроме того, недостатком этих материалов является усадка, которую можно уменьшить, выдерживая материал до применения и используя гибкие и эластичные материалы типа битумно-эластомерного наплавленного полотна в качестве гидроизоляционного слоя.

На этом фоне более привлекательными выглядят теплоизоляционные материалы на основе легких органических заполнителей и минерального вяжущего вещества, а также из сырья природного происхождения, которые являются трудносгораемыми и биостойкими материалами (при условии введения добавок эффективных антипиренов и антисептиков). Наиболее долговечными и экологически чистыми, несомненно, являются минеральные теплоизоляционные материалы (пеностекло, ячеистые бетоны и т.д.). Поэтому, несмотря на более высокую стоимость, в настоящее время применение именно этих материалов растет (особенно с учетом последних достижений науки и технологии в снижении их плотности и теплопроводности).

## 14. АКУСТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

*Акустическими называются материалы, способные уменьшать энергию звуковой волны, снижать уровень громкости внутреннего или внешнего шума.*

Акустические материалы принято подразделять в зависимости от назначения, структуры и свойств на звукопоглощающие и звукоизоляционные или прокладочные.

### 14.1. Звукопоглощающие материалы

**Особенности структуры и свойств.** Звукопоглощающие материалы и изделия предназначены для снижения уровня звукового давления в помещениях жилых, производственных и общественных зданий. Поток звуковой энергии при падении звуковых волн на поверхность ограждения частично отражается поверхностью ограждения, остальная звуковая энер-

гия проходит через ограждение. Коэффициент звукопоглощения равен отношению неотраженной энергии, поглощенной поверхностью, к падающей энергии в единицу времени. Поглощение звуковой энергии в однородном пористом материале происходит за счет энергетических потерь на вязкое трение, преодолеваемое воздушным потоком в порах материала, теплообмена между стенками пор и воздухом, релаксационных процессов в материале с неидеальной упругостью скелета. Чем большую пористость имеет материал, чем больше развита поверхность пор и больше пор сообщается между собой, тем больше его звукопоглощение. Поэтому звукопоглощающие материалы должны обладать большой открытой пористостью преимущественно сообщающегося и разветвленного характера. Желательны размеры пор от 0,01 до 0,1 см. Звукопоглощение на низких частотах происходит в более крупных порах. Увеличение влажности материала резко снижает коэффициент звукопоглощения по всему диапазону частот.

Эффективность звукопоглощающих материалов оценивается по *классам* в зависимости от величины коэффициента звукопоглощения: свыше 0,8 – первый класс; от 0,8 до 0,4 – второй и от 0,4 до 0,2 включительно – третий. Звукопоглощение материалов зависит от их толщины, расположения по отношению к источнику звука и других факторов. Для усиления поглощения звуковой энергии материалы дополнительно перфорируют. Размер и форма отверстий в изделиях, их наклон, глубина, а также процент перфорации, т.е. отношение площади, занимаемой отверстиями, к общей площади плиты, влияют на коэффициент звукопоглощения. При этом обычно перфорация плит увеличивает коэффициент звукопоглощения более чем на 10-12 %.

Большинство применяемых в настоящее время звукопоглощающих материалов обладают большой гигроскопичностью и не обладают водостойкостью. Между тем в процессе производства материалов, а также перевозки, хранения и монтажа изделия могут приобретать до применения «в дело» нежелательное увлажнение. При эксплуатации в среде с относительной влажностью более 70 % они могут быстро сорбировать влагу из воздуха. В результате эти материалы и изделия теряют свои звукопоглощающие свойства. Поэтому в частности звукопоглощающие пористо-волокнистые (мягкие и полужесткие) материалы должны выпускаться только с защитными продуваемыми и непродуваемыми оболочками, препятствующими высыпанию мелких волокон и пыли.

**Основные виды звукопоглощающих материалов и их применение.** Самыми эффективными звукопоглощающими материалами, имеющими высокие значения коэффициентов звукопоглощения в широкой полосе частот (от 125 до 8000 Гц), являются *минераловатные* изделия из супертонкого стекловолокна. Однако их применение допускается при наличии специальных покрытий, обеспечивающих высокую степень защиты от нежелательной эмиссии частиц стекловолокна. При этом для выполнения

своих акустических функций такое покрытие должно быть пористым, т.е. негерметичным. Безукоризненно совместить подобные требования удается немногим фирмам-производителям.

Достаточно эффективные звукопоглощающие материалы плотностью 250-500 кг/м<sup>3</sup> получают из *вспученного перлита* и вяжущего из жидкого стекла или синтетических смол. *Газосиликатные* плиты «Силакпор» выпускают обычно плотностью до 350 кг/м<sup>3</sup> в сухом состоянии. При этом прочность при сжатии составляет до 0,1 МПа. Промышленность выпускает *гипсовые* плиты со сквозной перфорацией. Плиты армируются дробленым стекложгутом и поливинилхлоридным шнуром, стеклопором, перлитом. Эффективен *двухслойный* материал, наружным слоем которого является перфорированная плита из гипсокартонного листа, а внутренним, подстилающим слоем – нетканое полотно или фильтровальная бумага.

*Звукопоглощающие отделочные изделия* выпускают в основном в виде плит, имеющих хороший декоративный внешний вид, различные размеры. Фактура этих плит может быть щелевидной, трещиноватой, бороздчатой, круглой, иметь рельефы и быть окрашенной. Звукопоглощающие плиты лучше располагать в конструкции с различным воздушным зазором – «на отnose». Используют для звукопоглощения в конструкциях *резонаторы*, т.е. щиты или пластины, расположенные на некотором расстоянии от поверхности ограждения; кроме того, применяют резонаторные перфорированные экраны, располагаемые вдали от ограждения и оклеенные с обратной стороны тканевым покрытием.

В общественных и промышленных зданиях используют *звукопоглощающие устройства*, которые изготовляют из металла, фанеры, пластмассы в виде перфорированных панелей, расположенных «на отnose» от стены. Используют пустотелый звукопоглощающий керамический кирпич, имеющий форму акустического резонатора – полости с узкой горловиной. Керамический звукопоглощающий материал является не только отделкой, но и несущим строительным элементом.

## 14.2. Звукоизоляционные материалы

Звукоизоляционные, или, как их часто еще называют, прокладочные, материалы применяют для звукоизоляции от ударного шума в многослойных конструкциях перекрытий и перегородок и частично для поглощения воздушного шума. *Нормируемыми* параметрами звукоизоляции являются индекс изоляции воздушного шума ограждающей конструкции и индекс приведенного уровня ударного шума над перекрытием (в децибелах).

Звукоизоляционная способность конструкции зависит от ее структуры, размеров, массы, жесткости, внутреннего сопротивления материала прохождению звука, способа опирания и других особенностей. В зависимости от структуры конструкции делят на акустические однородные и аку-



стические неоднородные. К первым относят конструкции, которые совершают колебания как единое целое, у вторых отдельные части совершают отличные друг от друга перемещения, что возможно при слоистой системе конструкции из разнородных материалов. Звукоизолирующая способность акустически однородных конструкций прямо пропорциональна десятичному логарифму массы, что определяет их недостаточную эффективность. Повышения звукоизолирующей способности акустически неоднородных конструкций добиваются применением слоистых систем с прослойками, в том числе воздушными, в которых динамический модуль упругости материала несоизмеримо меньше упругости материала жестких слоев. Например, модуль упругости бетонов – от 5000 до 30000 МПа, а воздуха – всего 0,14 МПа. Примером акустически неоднородных конструкций являются межквартирные стены, разделенные воздушным промежутком или звукоизоляционными прокладками, а также перекрытия с раздельными «плавающим» полом и потолком и не имеющие жестких связей между слоями.

Важнейшим свойством, определяющим эффективность изоляционного прокладочного материала, является его *жесткость*. Жесткость связана с толщиной прослойки и динамическим модулем упругости материала. По величине динамического модуля упругости звукоизоляционные прокладочные материалы делятся на классы: I – до 1 МПа, II – от 1 до 5 МПа, III – от 5 до 15 МПа. По *деформативности* звукоизоляционные материалы делятся на мягкие (относительное сжатие свыше 15 %) – имеют волокнистую или пористо-губчатую структуру; полужесткие – имеют относительное сжатие от 5 до 10 %; жесткие – до 5 % и твердые – около нуля.

В качестве эффективных звукоизоляционных материалов применяют *маты и плиты полужесткие минерало- и стекловатные на синтетическом связующем, маты стекловатные прошивные, плиты древесноволокнистые, пенопласты (полиуретановые и поливинилхлоридные), пористую резину*.

## 15. ОТДЕЛОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 15.1. Общие сведения

*Материалы, применяемые для отделки строительных конструкций и сооружений, должны защищать их от воздействия окружающей среды; придавать завершающее архитектурное оформление; создавать особые санитарно-гигиенические условия, уменьшающие запыление, загрязнение, увлажнение, защиту от шума и др.; обеспечивать возможность восстановления поверхности отделки. Во всем мире резко увеличивается объем производства отделочных материалов, расширяется ассортимент, повышаются качество и выразительность, столь необходимые современному городу, общественным зданиям и жилищу.*

Разнообразные отделочные материалы и изделия, применяемые в современном строительстве, классифицируют по *технологическому признаку* (лакокрасочные материалы, изделия из природного и искусственного камня, керамики, стекла, металлов, лесных материалов, полимеров и др.) и *архитектурно-строительным видам* (материалы для наружной отделки; внутренней отделки; покрытия полов; специальных целей). Ряд материалов и изделий применяют для отделки как внутренних интерьеров, так и фасадов зданий, предъявляя к ним повышенные эксплуатационные и эстетические свойства. Среди эксплуатационных свойств важнейшими являются санитарно-гигиенические, создающие в помещениях здоровые условия для жизни, работы и отдыха, а также огнестойкие, токсикологические, радиационные характеристики, удовлетворяющие соответствующим нормам. Условиями высокого эстетического качества являются подчинение отделки законам красоты, гармонии, художественного вкуса, образная передача цветового тона, чистоты, насыщенности цвета, цветового рисунка, структурно-текстурных особенностей материала.

Решающее влияние на техническую и экономическую эффективность отделочных материалов оказывают фактический срок службы, эксплуатационные расходы на текущие и капитальные ремонты, а также общий срок службы с учетом морального старения.

## 15.2. Лакокрасочные материалы

*Лакокрасочными материалами называют вязкожидкие составы, наносимые на поверхность конструкции тонким слоем, который через определенное время отвердевает и образует пленку, прочно сцепляющуюся с основанием.* В настоящее время эти материалы являются наиболее распространенными среди отделочных.

Лакокрасочные материалы обычно совмещают функции отделки и защиты поверхности строительных конструкций из металла, железобетона, дерева, кирпича и других материалов от воздействия среды. К лакокрасочным материалам относятся: 1) грунтовки и шпатлевки для подготовки поверхности к окраске; 2) красочные составы (краски), образующие покрытия нужного цвета; 3) лаки, создающие пленку, отличающуюся блеском; 4) компоненты грунтовок, красок, лаков – связующие вещества, пигменты, растворители и разжижители (разбавители), пластификаторы, отвердители и другие специальные добавки.

**Общая характеристика лакокрасочных материалов.** По основному составу лакокрасочные материалы – это композиты, состоящие из матричного связующего (пленкообразующего) вещества и наполнителя (в том числе пигмента). Краски (красочные составы) бывают масляные, эмалевые, водные (водоразбавляемые) и др. Растворитель и разбавитель позволяют получить жидко-вязкую консистенцию состава, в том числе без дополнительного расхода связующего. Этими компонентами соответственно явля-

ются органические растворители и вода (в водных и вододисперсионных красочных составах). Полимерное связующее и органический растворитель образуют лак, а лак с пигментом составляют эмаль (эмалевую краску).

Красочные материалы и покрытия различают преимущественно по химическому и эксплуатационному признакам (табл.4). В основу обозначения материалов положены вид, природа пленкообразующего вещества и их назначение. Обозначение красочных составов имеет буквенные и цифровые индексы. Буквы обозначают принадлежность материала к той или иной группе по роду пленкообразующего, например, алкидноакриловые – АС, глифталевые – ГФ, кремнийорганические – КО, мочевиные (карбамидные) – МИ, перхлорвиниловые – ХВ, полиакриловые – АК, полиамидные – ПА, поливинилацетатные – ВА, силикатные – ЖС, эпоксидные – ЭП и т.д. В табл. 4 приведена классификация красочных материалов по группам эксплуатации покрытий.

Таблица 4. Классификация красочных материалов по группам эксплуатации

Наименование материала по назначению	Группа эксплуатации	Условия эксплуатации
Атмосферостойкие	1	Покрытия, стойкие к различным климатическим воздействиям, эксплуатируемые на открытой площадке
Ограниченно атмосферостойкие	2	Покрытия, эксплуатируемые под навесом и внутри неотапливаемых помещений
Консервационные	3	Покрытия, применяемые для временной защиты окрашиваемой поверхности
Водостойкие	4	Покрытия, стойкие к воздействиям воды и ее паров
Специальные	5	Покрытия, обладающие специфическими свойствами: стойкостью к рентгеновскому излучению; светящиеся

*Пример обозначения.* Эмаль ХВ-16 – перхлорвиниловая эмаль (ХВ) для атмосферостойких покрытий 1, регистрационный номер 6.

Красочные составы по своей консистенции могут быть жидкими, вязкими, пастообразными. Каждому способу нанесения краски соответствует оптимальная вязкость, при которой не возникают дефекты поверхности покрытий. Для определения вязкости красок применяют вискозиметры. *Жизнеспособность* красочных составов определяется временем, в течение которого вязкость системы после смешения компонентов практически не изменяется. *Технологичность* нанесения красочного материала зависит от

времени высыхания связующего, в течение которого жидкий лакокрасочный состав, нанесенный тонким слоем, затвердевает и превращается в пленку.

**Основные компоненты красочных составов.** В качестве сырья в производстве красок и лаков применяют пленкообразующие вещества, наполнители, пластификаторы, растворители, сиккативы, а также вспомогательные материалы (стабилизаторы, диспергаторы и т.д.).

*Пленкообразующие вещества или связующие* служат для сцепления между собой частиц пигмента и создания тонкой пленки лакокрасочного покрытия, прочно держащейся на окрашенной поверхности. От свойств связующего зависят технологические и эксплуатационные свойства, а главное долговечность красочного покрытия. В масляных красках в качестве связующего используют олифы; в нитролаках – производные целлюлозы; в клеевых красках – клеи и т.д.

*Пигменты* – это сухие красящие порошки, являющиеся также наполнителями системы, нерастворимые в воде, масле и других растворителях. По *происхождению* пигменты классифицируют на природные (минеральные) и синтетические (минеральные и органические). *Природные* пигменты получают путем измельчения, обогащения, термической обработки минерального сырья (охра, умбра, сурик железный и др.). *Синтетические неорганические* (титановые, литопоновые и цинковые белила, сурик свинцовый, оксид хрома и т.д.) и *органические* (фталоцианиновые красители и др.) пигменты получают в результате сложных химических реакций и технологических процессов.

В отделочные составы для их удешевления, повышения декоративных и защитных свойств добавляют тонкоизмельченные *наполнители*: тальк, диатомит, молотый песок, слюду и особенно часто мел и известняки. Расширяется применение в качестве наполнителей органических полимерных порошков: полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида и др.

**Масляные краски** представляют собой смесь пигмента и связующего вещества (олифы), тщательно протертых в специальных машинах-краскотерках до получения однородной смеси. Олифа способна "высыхать", отвердевая за счет окисления кислородом воздуха. Ускоряют этот процесс сиккативы ("сикко" в переводе "сушить", "высушивать").

*Олифы* делят на четыре вида: а) натуральные (получаемые при переработке растительных масел); б) полунатуральные или уплотненные (олифа-оксоль – раствор окисленного растительного масла и сиккативов в уайт-спирите); в) комбинированные – продукты полимеризации и обезвоживания высыхающих или полувсыхающих масел; г) синтетические (сланцевая, олифа этиноль).

К масляным краскам для экономии пигмента допускается добавка наполнителей (тальк, сернокислый барий, барит). Различают густотертые и

готовые к применению масляные краски. Густотертые краски производят в виде паст и доводят до рабочей вязкости добавлением олифы.

**Лаки** представляют собой растворы пленкообразующих синтетических или натуральных смол в органических растворителях, образующие после высыхания твердую прозрачную однородную пленку. В строительстве в основном применяют масляно-смоляные, нитроцеллюлозные, битумные и другие лаки.

Недостатком лаков и эмалей является наличие в них органического растворителя, а следовательно, токсичность, взрыво- и пожароопасность, вследствие чего окраска должна производиться в специальных герметических окрасочных камерах, снабженных вентиляционным устройством. Эти материалы в своем большинстве содержат до 50 % летучих органических растворителей, что создает серьезный источник экологической опасности.

**Эмали (эмалевые краски)** получают в результате перетираания сухих пигментов с лаками.

*Алкидные* (глифталевые и пентафталевые) эмали выпускают готовыми к употреблению, а при загустевании к ним добавляют скипидар или уайт-спирит. Эти эмали обладают определенной твердостью, атмосферостойкостью, способностью высыхать при обычной температуре не более чем за 1-2 суток. Они применяются для окраски металла, прошпаклеванных штукатурных поверхностей и т.д.

Применяют также *нитроэмалевые* краски на основе нитролаков. Нитроэмалевые краски отличаются быстрым высыханием – 15-45 минут.

*Летучесмоляные (перхлорвиниловые)* краски представляют собой суспензию пигментов в перхлорвиниловой смоле, растворенной в органических растворителях. Их применяют для наружных работ по штукатурке, бетону, камню, кирпичу и дереву.

**Водоразбавляемые краски.** В малярных работах широко применяют *водоразбавляемые* краски в виде готовых форм – водоэмульсионные или вододисперсионные, полимерцементные, силикатные – и приготавливаемые на месте работ – клеевые, известковые, цементные и др. *Вододисперсионные* краски состоят из двух несмешивающихся жидкостей, при этом частицы одной – глобулы – распределены в другой – дисперсионной или внешней фазе, эмульгатора, препятствующего слипанию глобул, пигмента и специальных добавок. Вода, являясь внешней фазой, отсасывается пористым основанием подложки, на которую нанесена краска, и частично испаряется. При этом происходит распад эмульсии, слипание глобул и образование красочного покрытия. После отверждения покрытие становится водостойким, воздухопроницаемым. При этом вододисперсионные краски не токсичны и технологичны, так как могут легко разбавляться водой до требуемой вязкости. К вододисперсионным относятся *поливинилацетатные* (на основе ПВА-дисперсии) краски, обладающие определенной водостойкостью, достаточной адгезией к бетону, штукатурке, дереву, а также *сти-*

*ролбутадиеновые* (на основе латекса СКС-5) и *акрилатные* краски, отличающиеся водостойкостью, повышенной атмосферостойкостью и долговечностью и применяемые для отделки фасадов зданий, влажных помещений.

**Порошковые краски** представляют мелкодисперсную сухую смесь, состоящую из твердых полимеров, наполнителей, пигментов и специальных добавок. Покрываются на защищаемую поверхность различными методами с разогревом красочного состава до рабочей вязкости и переходом в капельно-жидкое состояние. Последующая монолитизация – слияние частиц краски и их отверждение – приводит к образованию химически стойкого покрытия в широком интервале температур эксплуатации.

**Краски на неорганических вяжущих и клеевые краски.** В качестве связующего *известковых* красок применяется гашеная известь. Срок службы таких покрытий на воздухе низок. В качестве связующего *цементных* красок применяют белый или цветной цементы. Для повышения водостойкости состава в него вводят известь-пушонку и хлористый кальций. Цементные краски применяют для наружных работ. *Силикатные* краски представляют суспензию пигментов и активных наполнителей (диатомита или трепела) в водном растворе силиката калия. Краска относительно водостойка. Силикатными красками окрашивают фасады зданий, а также деревянные конструкции для защиты от возгорания. *Казеиновые и клеевые* краски представляют собой суспензии пигментов и наполнителей в водных или водно-щелочных растворах клея или казеина. Клеевые составы не водостойки, их применяют для внутренней отделки помещений. Для повышения прочности и водостойкости покрытий в клеевые составы вводят олифу.

### 15.3. Материалы на основе древесины и продуктов ее переработки

Древесина относится к традиционным материалам, издавна используемым при отделке помещений и устройстве покрытий полов. Она долгое время будет удерживать и, может быть, улучшать свои позиции даже на фоне современных материалов благодаря своей высокой экологичности, тогда как в состав многих искусственных материалов входят небезвредные и даже токсичные вещества. Используются пиломатериалы: доски, рейки, вагонка, плинтусы, накладки и пр., а также изделия из древесины (щиты, паркет и др.). Эти изделия часто покрывают лаками, в том числе цветными, а в случае наружной отделки лак совмещают с составами, предотвращающими гниение, – антисептиками, иногда антипиренами. Разные деревянные изделия, скульптура из дерева являются большей частью произведениями искусства и используются для отделки интерьеров, включая деревья с интересными пороками, например, свилеватостью, кривизной, различными сучками и т.п.

Находят применение более дешевые материалы на основе продуктов переработки древесины и отходов деревообработки: *древесноволокнистые, древесностружечные плиты, фанера и т.п.* Для устройства чистых полов могут применяться водостойкие сверхтвердые древесностружечные плитки и панели со специально обработанной лицевой поверхностью (*ламинат*), имеющие высокую прочность при изгибе. Одним из эффективных приемов использования отходов и низкокачественной лиственной древесины является ее *модифицирование полимерами*, повышающее прочность, влаго- и огнестойкость, стойкость к агрессивным средам, формостабильность.

Продукты глубокой переработки древесины – картон и бумага – также находят широкое применение в отделке помещений. Например, отделку внутренних стен помещений часто производят *бумажными обоями*, ассортимент которых огромен. В последнее время появились грубоволокнистые обои из плотного нижнего и гладкого верхнего слоев. Такие обои обычно клеят встык и потом покрывают слоем лака. Моющиеся долговечные обои состоят из двух слоев: бумага или ткань и синтетическое покрытие. Структурные обои состоят из двух полотен бумаги, тисненых еще во влажном состоянии. Изготавливают также металлические, тканевые, велюровые обои, обои из стекловолокна на бумажной основе и др.

#### 15.4. Отделочные каменные материалы

*Природный* камень применяется в основном для наружной отделки монументальных и общественных зданий. Для этой цели используют плиты и блоки из гранита, диорита, сиенита, лабрадорита, андезита, известняка, доломита, кварцита, кремнистого песчаника и др. Толщина плит 4-8 см. Применение мрамора не рекомендуется, так как в окружающей среде современного города он быстро корродирует. Структурно-текстурные особенности горных пород, наличие причудливого рисунка с своеобразным расположением минералов, особенно в полированных плитах, украшают строительные объекты, дают им долгосрочную эксплуатационную защиту от влияния среды. Для внутренней отделки используют менее прочные породы: гипс, ангидрид, мрамор, ракушечник. Они хорошо распиливаются, и толщина плит может быть до 4 см.

Широко используется отделка *декоративным (архитектурным) бетоном* с использованием белых и цветных цементов, с заполнителями из дробленых горных пород – известняка, гранита, мрамора, а также боя цветного стекла и керамики. Применяется искусственный мрамор, изготовленный на минеральном и полимерном вяжущем, который конкурентоспособен природному мрамору, превосходит его по эксплуатационным показателям и имеет большую цветовую гамму. Декоративный бетон должен обладать высокой прочностью и морозостойкостью. Необходимым ус-

ловием долговечности отделки является также высокая прочность сцепления отделочного слоя с основанием конструкции, стабильная во времени.

В качестве декоративных покрытий используют штукатурки из мелкозернистого песка с введением слюды, перлита, стеклянной и полимерной крошки. Поверхность штукатурок может быть шероховатой, гладкой, бороздковой. Каменные материалы выполняют при отделке не только декоративную, но и конструкционную функции.

### **15.5. Отделочные материалы из керамики, стекла, металла**

Из *керамики* наиболее распространены облицовочные кирпич, блоки, плитки, получаемые из цветных природных глин белого, красного и кремового цветов, а также с добавками пигментов (серых, черных, коричневых, розовых). Производят также объемную керамику с крупным рельефом поверхности или бордюры. *Керамическая плитка* выпускается специально для полов (более 50 видов), облицовки стен (более 40 видов), реже для облицовки фасадов. На плитки наносят глазурь, что делает их более износостойкими, долговечными и улучшает декоративные свойства. *Керамический гранит* производят из глинистых материалов с введением минеральных добавок, в том числе пигментов. Плитки из керамического гранита не уступают природному камню по прочности, износостойкости, термостойкости, морозостойкости, текстуре, но более хрупкие.

В последнее время существенно повысилась роль облицовочных материалов из *стекла*. Из стекла производят, например: стекло цветное глушенное типа «Марблит»; стекло крупноразмерное закаленное; эмалированную плитку; ситаллы и шлакоситаллы; смальту; цветную стеклянную крошку; эрклез (кусковое дробленое стекло) различного цвета и т.д. Интересно сочетание наружного и внутреннего *остекления*, применения *стеклопакетов* с другими элементами фасадов зданий и интерьеров помещений. Стекло удачно используют в сочетании с алюминием и другими цветными *металлами*.

### **15.6. Отделочные материалы на основе полимеров**

**Материалы для отделки стен и потолков.** К ним относятся декоративные пленки, рулоны для облицовки стен, потолков, встроенной мебели; набранные рейки, профили, плинтусы, раскладки; отделочные плитки и панели.

*Линкруст* – рулонный материал с рельефным рисунком, состоящий из пластической массы на основе синтетической смолы с наполнителем, нанесенной на бумажную подоснову.

Созданы плоские *панели и специальные системы из поликарбоната* для легких светопрозрачных конструкций.

*Цветные длинномерные элементы* для отделки зданий, называемые погонажными изделиями, – плинтусы, поручни лестничных перил, налич-



ники, нащельники, защитные уголки для лестничных перил, проступи и т.п. — изготавливают на основе поливинилхлорида, полиэтилена, полистирола, органического стекла. Такие профильно-погонажные изделия имеют гладкую поверхность, окрашиваются в различные цвета.

Широко применяют оклеивающие пленки на полимерной основе и самоклеющемся основании, применяемые в кухнях, коридорах, сантехузлах.

**Материалы для отделки полов.** Покрытие полов часто производят линолеумом, различными ворсовыми покрытиями в виде ковров, дорожек, а также штучными изделиями (плитками и панелями). Иногда делают монолитные покрытия полов.

*Линолеум* выпускают безосновный и на теплозвукоизоляционной основе (тканевой, войлочной, вспененной). Независимо от основы линолеум может состоять из двух или большего количества слоев. Верхний лицевой слой содержит меньше наполнителей, более стоек к истиранию, эластичен и декоративно оформлен. Последний слой, более жесткий, содержит меньше полимера и больше наполнителей, чем лицевой. Наполнителями служат тонкие минеральные порошки (мел, тальк и др.). Линолеум на тканевой основе получают путем нанесения пасты, содержащей полимер, пластификатор, наполнитель, краситель и другие добавки, на джутовую или иную ткань. Войлочную основу линолеума пропитывают антисептиками для придания биостойкости. Полы из линолеума гигиеничны, влагостойки, достаточно прочны. Они отличаются разнообразием цветовых решений и высоким качеством рисунков, имитирующих паркет, плитку, мрамор. К недостаткам линолеума можно отнести его относительную недолговечность.

*Ковровые синтетические материалы* (ковролин, ворсолин и др.) имеют основу из полиуретана (или другого полимера), а для верха ковра применяют синтетические волокна, из которых изготавливают тканые и нетканые покрытия. Например, ворсолин состоит из двух слоев: основой его служит поливинилхлоридная пленка, а покрытие выполнено из ворсовой пряжи.

*Плитки* для пола изготавливают из поливинилхлорида, инденкумаронового полимера или резины. Износостойкие и химически стойкие плитки получают также из фенолоальдегидных прессовочных порошков, состоящих из полимера, наполнителя и добавок.

Из полимерных материалов можно устраивать *монолитные* полы, не имеющие швов. Для этой цели применяют мастики, состоящие из связующего полимерного вещества, наполнителей, специальных добавок и красителей. Широкое распространение получили *самовыравнивающиеся наливные* полы различных составов (эпоксидные, акриловые, полиуретановые и др.). Они характеризуются высокой технологичностью, получением абсолютно ровной поверхности, не нуждающейся в дополнительной шлифовке

и полировке, но в то же время – высокой стоимостью. Наиболее прогрессивными являются составы на основе полимерцементных композиций с суперпластификаторами и модификаторами структуры. Полимербетонные наливные полы для промышленных зданий толщиной 20-50 мм не только химически стойки, но и способны выдержать тяжелые нагрузки, возникающие при работе внутрицехового транспорта.

**Полимерные клеи и мастики.** *Клеи* из синтетических материалов обладают высокой клеящей способностью (адгезией) и водостойкостью. Разработаны универсальные составы, которые в отличие от природных клеев хорошо склеивают древесину, пластмассу, металлы, керамику, стекло, природные и искусственные камни. Полимерные клеи дают возможность просто и быстро осуществлять сборку строительных элементов. При этом прочность клеевых стыков может быть выше прочности самого материала. Применяют полимерные клеи, главным образом на эпоксидных смолах, для ремонта железобетонных конструкций. Применение клеев способствовало развитию производства индустриальных деревянных клеевых конструкций. Клеи изготавливают из различных полимерных смол, каучуков и производных целлюлозы. Для регулирования свойств в клеи вводят растворители, наполнители, пластификаторы, отвердители.

*Мастиками* называют высоковязкие полимерные композиции, способные склеивать различные материалы, покрывать поверхность конструкций довольно толстым слоем для предохранения их от коррозии, заполнять щели, раковины, отверстия и другие углубления для получения гладкой поверхности или обеспечения герметичности. По свойствам и технологии мастики отличаются от клеев только повышенной вязкостью или значительным содержанием наполнителя.

## **16. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **16.1. Общие принципы получения строительных материалов**

При изготовлении строительных материалов и изделий сырье подвергают комплексу механических, химических, физико-химических, тепловых и других воздействий. В результате реализации и определенной последовательности этих технологических воздействий сырье либо изменяет только форму и размеры частиц вещества, получает большую однородность и очищается от загрязнений, либо претерпевает существенные изменения состава, внутреннего строения и качественных характеристик.

Каждая разновидность строительных материалов и изделий нуждается в специальной технологии. Последняя выражается своим регламентом, параметрами режимов, минимальным размером затрачиваемой энергии и сырьевых ресурсов, достижением экономически эффективных результатов и высоких показателей качества готовой продукции. При большом разно-

образии специфических технологий материалов и изделий они содержат и ряд типичных операций (переделов). Это связано с тем, что в их основе лежат общие физические или физико-химические зависимости, сходные кинематические схемы действия оборудования и машинного парка, близкие методы использования тепловой или иного вида энергии и т.п.

К **типичным переделам (операциям)**, обеспечивающим получение строительных материалов и изделий, относятся:

*основные* – подготовка сырья; перемешивание отдозированных сырьевых компонентов; формование получаемой смеси (массы) и уплотнение отформованных изделий; специальная обработка уплотненных изделий до полного их отвердевания; технический контроль качества готовой продукции;

*вспомогательные* – контроль за кондицией технологического регламента; транспортирование сырья и перемешанной смеси (массы); перемещение готовых изделий; складирование сырья и изготовленной продукции.

В некоторых технологиях могут отсутствовать отдельные операции, или по технологической схеме их продолжительность равна нулю. Ниже излагаются главные принципы и закономерности, лежащие в основе переделов (операций) в технологии и необходимые для придания материалу оптимальной структуры и заданных свойств.

**Подготовка сырья.** К подготовительным работам относится комплекс операций, сопутствующих практически всем технологиям. Их основное назначение — придать сырью *технологическое состояние*, удобное и эффективное при прохождении сырья по последовательному циклу переделов с образованием готовой продукции. В зависимости от разновидности сырья и конкретной технологии подготовительные операции заключаются в дроблении, помоле и других способах перевода сырья в тонкодисперсное состояние; фракционировании, просеве, промывке и других методах очищения поверхности частиц и разделения их на отдельные группы (фракции); увлажнении или обезвоживании (сушке) сырья; обогащении, т.е. повышении однородности сырья по средней плотности, прочности и другим качественным показателям.

*Измельчение и помол* – наиболее распространенные подготовительные операции. Уменьшение размеров частиц грубозернистых сырьевых материалов вызывается необходимостью обеспечить определенное соответствие между размерами частиц смеси и конструктивными элементами изделий; облегчить технологические операции на стадиях приготовления смеси; повысить плотность и однородность дробленого материала; увеличить удельную поверхность порошкообразного вещества после помола исходного материала.

После некоторой тонкости помола потенциальная энергия поверхности может возрасти в такой мере, что нередко происходит самопроизвольное (спонтанное) агрегирование (слипание) частиц с уменьшением удель-

ной поверхности и увеличением комковатости и неоднородности исходного продукта. Рациональный предел тонкости помола устанавливают опытным путем. Он может быть повышен применением при помоле добавочных так называемых поверхностно-активных веществ, способных создавать на поверхности пленки, экранировать частицы и предотвращать их агрегирование. Кроме того, при высокой дисперсности помола существует опасность потери активности порошкообразного материала в период его хранения в связи с поглощением посторонних веществ (пыли, влаги, газов и др.) из окружающей среды. Приходится учитывать и то, что с увеличением степени измельчения значительно возрастают механическая работа и расход энергии на измельчение.

Весьма важная роль в подготовительный период отводится *тепловому воздействию* на сырьевой материал, чтобы его просушить, нагреть до необходимой температуры и даже подвергнуть кратковременному обжигу с целью, например, частичной или полной его дегидратации, аморфизации, укрупнения частиц для понижения пластичности (например, глины).

Процесс *сушки* проводят в сушилках различных конструкций и назначают с учетом особенностей исходного сырья как многокомпонентной системы, состоящей из вещества, слагающего сырьевой материал, влаги, воздуха и паров воды. При необходимости нагревание материала (сырья) может быть доведено до обжига в печных агрегатах по заранее рассчитанному режиму. Однако обжиг в подготовительный период требуется иногда лишь для снижения излишней пластичности сырья, например глин, при отсутствии поблизости песчаных карьеров.

Подготовленные сырьевые материалы транспортируют к местам временного *накопления* для последующих операций (дозирование, перемешивание). В емкостях (бункерах, силосах и др.) временного накопления и хранения подготовленных сыпучих материалов возможны заторы при их перемещении с образованием устойчивых сводов. Самопроизвольное прекращение истечения этих материалов приводит к нарушению общего ритма работы завода, дефектности дозирования, снижению однородности и качества смеси. Для борьбы с образованием сводов в толще сыпучего материала используют специальные устройства (сводообрушители).

**Дозирование и перемешивание компонентов смеси (приготовление сырьевой смеси).** На качество смеси изготавливаемого строительного материала может сильно влиять точность *дозирования*. Если под влиянием внешних или внутренних причин нарушаются точность дозирования (автоматического отвешивания или объемного отмеривания) или ритмичность перемещения отдозированных компонентов к смесительному аппарату, то в процессе перемешивания возможно снижение качества получаемой смеси (массы) и готового материала (изделия).

Для большинства технологий *перемешивание* отдозированных материалов является главной операцией, определяющей качество смеси

(массы) и готовой отформованной продукции. Наибольшее распространение получил способ перемешивания с введением в смесь механической энергии от внешнего источника, а среди типов смесителей для приготовления сложных многокомпонентных смесей наиболее эффективны смесители принудительного действия.

С целью улучшения однородности смеси механическое перемешивание, как правило, осуществляется в две стадии: 1) предварительное смешение сухих компонентов; 2) смешение с жидкостью, принятой как обязательный компонент (технологическая связка) многих сырьевых смесей. Это объясняется тем, что при перемешивании смеси сразу с жидкостью образуются агрегаты из частиц смеси под действием сил капиллярного сцепления, а это не дает возможности распределения частиц отдельных компонентов, особенно тонкодисперсных, по всему объему смеси. Перемешивание смеси в один этап становится эффективным при высоком содержании жидкой среды (в состоянии суспензии) и исчезновении сил капиллярного сцепления. При этом исчезают и электрические силы, действующие между частицами в сухих порошках, что обеспечивает высокую однородность получаемых смесей. Однако положительный эффект от такого перемешивания часто сводится на нет последующими высокими энергозатратами на высушивание сырьевой смеси перед обжигом (в технологиях керамики, цемента по мокрому способу и пр.).

Под влиянием сложного комплекса физико-химических процессов и химических реакций, протекающих при перемешивании в смесительных аппаратах, сырьевые компоненты теряют (обратимо или необратимо) свои индивидуальные свойства, особенно в поверхностных слоях, т. е. по границам контактирования компонентов и новообразований. К моменту выхода из смесительного аппарата процессы микроструктурообразования в одних системах в основном завершаются, в других – эти процессы в смесителях только начинаются, но не доходят до лавинного развития, а поэтому с большей или меньшей интенсивностью продолжают на последующих стадиях технологического цикла. При этом увеличение прочности полученного материала нередко связано с эффектом *механохимической активации* под влиянием дополнительного измельчения частиц при их взаимном столкновении или ударах о лопасти и стенки смесительного аппарата.

Свежеприготовленная смесь (масса) обладает определенной *технологичностью* или *удобообрабатываемостью*, что выражается в ее реальной способности воспринимать дальнейшие технологические операции по формованию и уплотнению изделий. Смеси с весьма малой вязкостью (часто называемые литыми) практически не требуют уплотнения при формовании изделий или покрытий, что технологически удобно. Для воспроизведения литейной технологии в смесь вводят соответствующие пластификаторы или суперпластификаторы. Введенные в относительно малых

количествах, они способствуют резкому понижению вязкости смеси, облегчая формование изделий. Той же цели можно достичь дополнительным увеличением количества жидкой среды в смеси (технологической связки), однако это обычно приводит к резкому снижению качественных показателей готовых изделий и даже браку (растрескиванию, короблению и др.).

При использовании смесей с повышенной вязкостью важно не допустить при формовании напряжений, способных разрушить сплошность изделия, т.е. определяющим в поведении таких систем становится соотношение между потенциальной энергией взаимодействия и кинетической энергией внешних механических воздействий на смеси, которые реализуются в результате перемещения и столкновения частиц при перемешивании, уплотнении и т.д.

**Уплотнение смеси и формование изделий.** Формование изделий сопряжено, как правило, с *уплотнением* смеси, т.е. с достижением плотной упаковки ее частиц. Уплотнение смеси уменьшает разобщенность частиц, переводя связи из точечных в межфазные по границам контакта. На последующих стадиях технологии (например, при обжиге) сокращается расход тепловой энергии за счет снижения температуры и уменьшения продолжительности выдержки.

Уплотнение формируемых или отформованных изделий является важным этапом образования макроструктуры, поскольку в этот период в среде вяжущего вещества сравнительно устойчиво фиксируются зернистые и другие компоненты заполняющей части композита. Фиксация может происходить как непосредственным примыканием компонентов, в том числе с возможным срастанием (например, кристаллов), так и через прослойки полностью отвердевшего или постепенно отвердевающего вяжущего вещества.

Контакт через прослойки на стадии уплотнения более типичен в технологиях, в которых отвердевание материала происходит в результате химических реакций (гидратаций, спекания и т.д.). Непосредственное контактирование или срастание частиц под влиянием поверхностной энергии, химических связей и других, в том числе комплексных, факторов (например, при прессовании под большим давлением) характерно для *контактно-конденсационного* механизма твердения.

При малых давлениях полезно в системе присутствие малых количеств жидкой среды как своеобразной смазки. При уплотнении высокопластичных и подвижных смесей макроструктура устанавливается весьма быстро и практически без приложения уплотняющих усилий, под влиянием гравитации (при наливных или литьевых способах производства). При уплотнении малоподвижных и жестких смесей, содержащих, как правило, пониженное количество вяжущего вещества или уменьшенное количество жидкой среды в нем, затрачивается значительно большая работа, чем при уплотнении пластичных, подвижных или литых смесей. Разными приема-

ми приходится принудительно сближать полидисперсные зерна, вытесняя часть вяжущего вещества в межзерновые поры и пустоты или в поры зерен заполнителя. При оптимальной структуре зерна заполнителя в объеме монолита контактируют через тонкие или тончайшие прослойки вяжущего вещества.

Выбор оптимального способа формования и уплотнения зависит от характера исходного сырья и массовости производства, требуемых свойств и вида изделий. Но при всех способах важно обеспечить связность и начальную прочность изделий с последующим упрочнением их на других стадиях обработки.

В технологии обжиговых материалах распространенными являются способы полусухого и пластического, а также горячего *прессования* с использованием прессов, экструдеров, каландров и других машин. При способе пластического формования (керамического кирпича) уплотнение осуществляется в ленточных прессах. Для достижения необходимой плотности применяют различные способы снижения реологического сопротивления формуемой смеси: введение поверхностно-активных веществ, пластификаторов и суперпластификаторов; предварительный нагрев; вибрационное воздействие; вакуумирование и др. Во многих технологиях формование и уплотнение смеси совмещаются в одну операцию, в результате чего химические и физико-химические процессы, обеспечивающие структурообразование на микро- и макроуровнях, протекают также одновременно. Кроме обычных прессов (механических, гидравлических) в некоторых технологиях используют прессование методом взрыва с образованием сверхвысоких давлений мгновенного действия с изменением кристаллохимического строения вещества.

В технологии бетона самым характерным является *вибрационное* формование с приданием скоростей и ускорений частицам массы и, как следствие, ослаблением сил внутреннего трения, капиллярных и молекулярных связей, а также тиксотропным разрушением первичных структур. При *вибрационном прессовании* (вибропрессовании) достигается заданное уплотнение изделий при значительно меньших затратах энергии, чем при статическом прессовании. Кроме того, возрастает качество изделий, отсутствует анизотропия свойств, формируется более равномерная структура. Эффективность виброформования в ряде технологий повышается путем совмещения с *вакуумированием*.

**Обработка отформованных изделий.** Большинство строительных композитов гидратационного твердения (бетоны, растворы, мастики и другие материалы), а также обжиговых материалов (в отличие от композитов контактно-конденсационного твердения, для которых структурообразование происходит в основном сразу – в процессе уплотнения и формования изделий) имеют две стадии формирования структуры: первоначальное образование структуры из пластичных многокомпонентных (и многофазных)

сырьевых смесей и последующее «укрепление» структуры твердеющего материала в результате сложных физико-химических процессов.

К весьма значительному технологическому переделу, влияющему на структурообразование искусственных каменных материалов, относится специальная *обработка* отформованных и уплотненных изделий с помощью одного, двух или большего количества внешних воздействий на материал в некотором последовательном или комбинированном порядке. Обработка может быть тепловой, тепловлажностной, химической, электрофизической, автоклавной, вакуумпропиточной, радиационной (нередко совмещаемой с вакуумпропиточной) и др. *Основная цель обработки* – обеспечить наиболее полное развитие процессов структурообразования, хотя соответствующие процессы могут продолжаться и после произведенной обработки, в том числе в эксплуатационный период работы конструкции.

Эффективность обработки характеризуется постепенным или быстрым *упрочнением* структуры свежеизготовленных изделий с переходом ее в твердое или твердообразное состояние. Новая фаза в виде химических соединений, возникающих под влиянием хемосорбционных реакций на поверхности твердых частиц или в растворе (расплаве), вначале появляется как скопление микрочастиц или в растворе (расплаве), вначале появляется как скопление микрочастиц; в последующий период проходит кинетическое развитие центров реакции. Продукты химических реакций выделяются в самостоятельную фазу, концентрация которой со временем нарастает.

В обжиговых материалах вяжущей частью служат расплавы как своеобразные разновидности химических растворов, обусловленных определенными внешними факторами. Переход из жидкого в твердое состояние при охлаждении происходит также под влиянием кристаллизации компонентов. При резком охлаждении происходит переход из жидкого состояния в твердое аморфное, стеклообразное, т. е. жидкость становится переохлажденной. Внесение твердой частицы того же вещества или, тем более, кристаллика приводит к незамедлительному процессу кристаллизации переохлажденного расплава с превращением его полностью в кристаллическое состояние. При этом молекулы перестраиваются из хаотического беспорядка в упорядоченное, обуславливаемое кристаллической решеткой, что значительно повышает прочность и стойкость материала.

К сопутствующим процессам структурообразования явлениям относятся усадка, экзотермические и эндотермические эффекты, явления релаксации и ретардации. *Усадка* – уменьшение в объеме, которое происходит под влиянием сжимающих капиллярных сил, перехода твердых компонентов в жидкое состояние с последующим заполнением пор и пустот жидкой средой, испарения части жидкой среды или ее синерезиса (выпотевания), снижения температуры (охлаждения), в том числе вследствие эндотермического эффекта. Различают усадку *воздушную* (при сушке) и *огневую* (при обжиге – в результате спекания). В результате усадки нередко



возникают самопроизвольные напряжения в материале и, как следствие, микротрещинообразование с возможным ухудшением физико-механических свойств строительных изделий. Различными приемами – регулированием режима отвердевания, введением дополнительных компонентов в смесь и др. – удастся уменьшить или полностью исключить влияние усадочных напряжений или деформаций, связанных с разуплотнением структуры.

*Тепловые эффекты* обусловлены химическими реакциями и физическими модификациями. *Эндотермические* эффекты возникают при разрушениях кристаллической решетки или испарении жидкости, полиморфных превращениях (инверсии) вещества. *Экзотермические* эффекты и реакции обуславливаются образованием новых фаз, сопровождаются поглощением газовой среды, переходом неустойчивого аморфного состояния в кристаллическое.

Таким образом, комплекс сложных процессов и явлений, возникающих и развивающихся в период технологических переделов до определенного уровня, а затем постепенно угасающих (в обжиговых материалах быстрее, чем в безобжиговых), позволяет получать изделие. Чтобы технологические переделы были эффективными, а качество продукции – более высоким, обосновывают их оптимальные режимы и параметры на всех основных стадиях производства.

## 16.2. Основы технологии бетона и железобетона

Технология *бетона* предполагает следующие основные операции: подготовка исходных компонентов, их дозирование и приготовление бетонной смеси, укладка смеси и ее уплотнение (формование изделий), твердение. Технология *железобетонных конструкций* включает дополнительно операции изготовления арматурных изделий, установки и фиксации арматуры в форме или опалубке (армирование), предварительное напряжение арматуры (в предварительно напряженных конструкциях).

**Подготовка исходных сырьевых компонентов.** Важной операцией при получении высококачественного бетона является *промывка* заполнителей – песка, дробленого камня (щебня), гравия – с целью уменьшения количества пыли и глины в смеси, а также их *фракционирование* для получения оптимального зернового состава и смеси заполнителей с минимальной пустотностью.

**Приготовление бетонной смеси.** Бетонные смеси готовят в бетоносмесительных цехах предприятий сборного железобетона или на автоматизированных бетонных заводах. Приготовление бетонной смеси состоит из точного дозирования и смешивания исходных материалов и должно обеспечить получение однородной системы. Составляющие материалы дозируют по массе (исключение допускается для воды и легких пористых заполнителей, которые дозируют по объему). Применяют дозаторы

с автоматическим и ручным управлением – последние для малых бетоно-смесительных установок. В автоматизированных бетоносмесительных цехах с центрального пульта управления с помощью компьютерных программ в автоматическом режиме осуществляется установка дозирующей аппаратуры на требуемую рецептуру смеси. Допускаются отклонения при дозировании цемента и воды  $\pm 1\%$ , для заполнителей –  $\pm 2\%$  (по массе).

*Бетоносмесительные машины циклического действия* подразделяют на гравитационные и с принудительным смешиванием. Для получения подвижных бетонных смесей применяют *гравитационные* бетоносмесители, работающие по принципу свободного падения перемешиваемого материала. При вращении барабана смесителя внутренние лопасти захватывают бетонную смесь, поднимают ее, затем бетонная смесь свободно падает с некоторой высоты и при этом перемешивается. Время перемешивания, необходимое для получения однородной бетонной смеси, зависит от емкости барабана и подвижности смеси и составляет: для смесителей емкостью до  $500 \text{ дм}^3$  – 1-1,5 мин; емкостью  $1200 \text{ дм}^3$  – около 3 мин и емкостью  $2400 \text{ дм}^3$  – около 5 мин.

Жесткие бетонные смеси необходимо перемешивать в смесителях *принудительного действия*. В этих смесителях бетонная смесь принудительно перемешивается в смесительной чаше или барабане при помощи смешивающих устройств: лопастей, лопаток, гребков и т.п. Широко применяют два типа бетоносмесителей с принудительным перемешиванием: *противоточные* с горизонтальной чашей, вращающейся в направлении, противоположном вращению смешивающих устройств, которые размещены в горизонтальной плоскости; *роторные* турбинного типа с горизонтальной неподвижной чашей и вращающимся в центре ротором, на котором насажены смешивающие устройства, расположенные в горизонтальной плоскости. В этих смесителях перемешанная смесь выгружается через люк в днище чаши.

Для приготовления растворных и мелкозернистых бетонных смесей используют лопастные и шнековые смесители с приводным *горизонтальным валом* (одновальные и двухвальные). Для жестких мелкозернистых смесей с низкими В/Ц эффективно *виброперемешивание*, при котором частицы совершают колебательные движения.

Бетоносмесители *непрерывного действия* требуют меньших удельных затрат электроэнергии и имеют значительно большую производительность ( $30, 60, 120 \text{ м}^3/\text{ч}$  бетонной смеси) по сравнению со смесителями циклического действия.

*Продолжительность* перемешивания сильно влияет на однородность и прочность бетона и должна быть оптимальной. С увеличением времени перемешивания до 2-3 мин (иногда больше – в зависимости от вида смеси и типа смесителя) смесь становится однороднее, и прочность бетона повышается.

Бетонный завод должен выдать на каждую партию бетонной смеси *паспорт*, в котором указывается марка бетона, удобоукладываемость бетонной смеси и др.

**Формование изделий.** В результате уплотнения бетонная смесь заполняет форму или опалубку, причем уплотненная бетонная смесь должна иметь однородное строение и минимальный объем воздушных пустот – не более 2-3 % воздуха (т.е. 20-30  $\text{дм}^3$  на 1  $\text{м}^3$  бетона). Для получения качественного бетона необходимо, чтобы удобоукладываемость бетонной смеси соответствовала принятому способу и интенсивности уплотнения. При интенсивном механическом воздействии достигается уплотнение жестких бетонных смесей, в результате повышается прочность бетона (при сохранении одинакового расхода цемента).

*Основным способом уплотнения бетонных смесей является вибрирование.* При *вибрировании* колебания, создаваемые вибратором, вызывают вынужденные колебательные движения частиц бетонной смеси. В силу движения полидисперсных частиц смеси с разными амплитудами и частотой преодолеваются силы внутреннего трения и сцепления между ними, зерна заполнителей укладываются компактно, промежутки между ними заполняются цементным тестом, а пузырьки воздуха вытесняются наружу. Степень уплотнения бетонной смеси контролируют по величине коэффициента уплотнения, который равен отношению фактической плотности свежееуплотненного бетона к его расчетной плотности. Уплотнение считается полным при коэффициенте уплотнения 0,98-1.

Для каждой бетонной смеси имеется своя оптимальная *интенсивность* вибрирования, которая достигается правильным сочетанием амплитуды и частоты колебаний. При принятых параметрах вынужденных колебаний для каждой бетонной смеси имеется своя оптимальная *продолжительность* виброуплотнения.

В зависимости от рода привода и движущей энергии различают электромеханические, электромагнитные и пневматические *вибраторы*. Чаще всего применяют вибраторы, приводимые в действие электродвигателем; колебания создаются механическим путем в результате вращения неуравновешенных грузов (эксцентров или дебалансов), которые могут быть расположены непосредственно на оси ротора двигателя либо соединены с ним при помощи гибкого вала. Рабочая часть вибратора выполняется в виде площадки (виброплощадки, переносные поверхностные вибраторы) или наконечника (штыка, булавы и т.п.). Для формования сборных железобетонных изделий широко используют стационарные *виброплощадки* различной грузоподъемности. *Переносные* поверхностные и глубинные вибраторы применяют при изготовлении изделий (в особенности крупноразмерных) на стендах, а также для уплотнения монолитного бетона на строительной площадке.

На практике часто используют *комбинированные* способы уплотнения бетонной смеси. Так, при формировании железобетонных изделий из жестких бетонных смесей применяют *вибрирование с пригрузом* (до 100 Па).

Приложением прессующего давления к поверхности изделия 0,05-0,15 МПа с одновременным вибрированием способом *вибропрессования* уплотняют особо жесткие бетонные смеси (при получении тротуарных плит, брусчатки, бордюрного камня и т.п.).

При *виброштамповании* бетонная смесь формируется и уплотняется при помощи погружаемого в нее виброштампа. Этот способ часто применяют для формирования коробчатых и ребристых плит, лестничных маршей со ступеньками и других профилированных изделий.

*Вибропрокат* осуществляется на специальных вибропрокатных станках. Этим способом изготавливают изделия из тяжелого и легкого бетонов (например, вибропрокатные керамзитобетонные панели).

При *центробежном* способе формирования (центрифугирование) для уплотнения бетонной смеси используют центробежную силу, возникающую при вращении формы с уложенной в нее бетонной смесью. Скорость вращения формы 400-900 об./мин. При этом бетонная смесь равномерно распределяется по стенкам формы и хорошо уплотняется. Часть воды затворения (20-30 %) отжимается к внутренней поверхности изделия, и тем самым понижается величина В/Ц. Это способствует уменьшению пористости и водопроницаемости бетона. Центробежное формирование применяют для изготовления полых изделий: труб, железобетонных полых колонн, опор и др.

*Вибровакуумирование* позволяет извлечь из свежееуложенной бетонной смеси 10-20 % общего количества воды затворения и получить более плотный бетон. Вакуумирование осуществляют специальным оборудованием (вакуум-щитами, вакуум-вкладышами и т. п.). Вакуум-щиты укладывают рабочей поверхностью, снабженной фильтровальной тканью, на бетон. Фильтр предотвращает отсос частиц цемента в процессе вакуумирования.

**Твердение бетона.** Гидратация цемента начинается сразу же после контакта с водой затворения. Она приводит к схватыванию и затвердеванию бетона. Параметрами, влияющими на гидратацию цемента и твердение бетона, являются: температура свежеприготовленной бетонной смеси; температура и влажность окружающей среды; тип цемента; содержание добавок; водоцементное отношение; дозировка цемента. Параметр, существенно влияющий на процесс схватывания и твердения, – это температура свежеприготовленной бетонной смеси, которая, в свою очередь, определяется температурой исходных материалов (цемента, воды, заполнителей). В зависимости от температуры смеси можно ускорить или замедлить процесс гидратации. С другой стороны, на температуру бетонной смеси влияет температура окружающей среды. Тип и содержание в смеси цемента так

же, как и водоцементное отношение, воздействуют на степень гидратации и твердение бетона.

Твердение можно ускорить, применяя быстротвердеющие цементы, жесткие бетонные смеси, добавки-ускорители твердения. Добавки золы-уноса или гранулированного доменного шлака снижают теплоту гидратации. Таким способом можно уменьшить риск образования трещин. При недостаточной влажности окружающей среды, если необходимая для гидратации вода испаряется из бетона, гидратация прерывается и твердение завершается. Это может привести также к эмиссии песка на поверхность бетона или к возникновению усадочных деформаций.

Различают естественное и искусственное твердение бетона. *Естественное* твердение наименее энергоемко, но требует времени и должно сопровождаться необходимым уходом за твердеющим бетоном, т.е. используя образующуюся теплоту гидратации после формования, поддерживая влажные условия окружающей среды и защищая от таких вредных воздействий, как жара, ветер, холод, проточная вода. После укладки и уплотнения бетонной смеси в летнее время поверхность бетона должна быть защищена от высыхания, а в первые часы – и от дождя. Для этой цели горизонтальные поверхности покрывают пленками, посыпают опилками и другими увлажняемыми материалами, поливают. Вертикальные поверхности в первое время защищает от высыхания опалубка, а после ее снятия поверхности поливают водой.

*Искусственное* твердение – это температурно-влажностная обработка, применяемая в заводских условиях; электропрогрев, чаще применяемый на стройплощадке и т.д. Методы тепловой обработки бетона дают возможность увеличить скорость химических реакций взаимодействия цемента с водой и значительно ускорить набор прочности бетона (около 70 % прочности – через 6-10 часов обработки).

На заводах сборного железобетона чаще всего применяют прогрев изделий при атмосферном давлении в паровоздушной среде с температурой до 80-85 °С. *Пропаривание* при нормальном давлении осуществляют в пропарочных камерах периодического или непрерывного действия.

При *электропрогреве* в качестве источника тепла используют электрическую энергию. Для прогрева бетона применяют трехфазный переменный ток нормальной частоты (50 Гц). Пропускание тока через уложенный бетон осуществляется через металлические электроды, располагаемые или на поверхности бетона (пластинчатые, полосовые), или внутри него (внутренние стержневые и струнные).

Способ *предварительного электроразогрева смеси* успешно применяют при зимних бетонных работах. При изготовлении бетонных изделий на заводах значительный эффект дает применение кратковременного (в течение 5-10 мин) электроразогрева бетонной смеси до температуры 80-90 °С электрическим током в специальных бункерах. Предварительно ра-

зогретую смесь укладывают в формы и уплотняют. Выделение тепла при гидратации цемента способствует поддержанию повышенной температуры твердеющего бетона и ускорению его твердения.

### **16.3. Изготовление сборных и монолитных железобетонных конструкций**

Железобетонные конструкции подразделяют на сборные и монолитные. Первые изготавливают на заводах или полигонах и монтируют на строительной площадке. Монолитные железобетонные конструкции бетонируют на месте строительства.

В **сборном железобетоне** изготавливают все основные части здания: фундаменты, стены подвалов, наружные и внутренние стены, элементы каркаса и покрытий, междуэтажные перекрытия, лестницы и др. Производство железобетонных и бетонных сборных конструкций может быть организовано двумя принципиально отличными способами: поточным в перемещаемых формах или на перемещаемых поддонах; стендовым в стационарных (неперемещаемых) формах.

При *поточном* способе все технологические операции (очистка и смазка форм, армирование, формование, твердение, распалубка) выполняются на специализированных постах, оборудование которых образует поточную технологическую линию. Формы с изделиями последовательно перемещаются по технологической линии от поста к посту. Поточный способ изготовления сборных железобетонных конструкций может быть поточно-агрегатным и конвейерным.

При *поточно-агрегатном* способе формы и формируемые изделия перемещаются от поста к посту краном с интервалом времени, зависящим от длительности операции на данном посту. Поточно-агрегатный способ используют на заводах средней мощности, в особенности при выпуске изделий широкой номенклатуры.

*Конвейерный* способ применяют на заводах большой мощности и при выпуске однотипных изделий. При этом способе технологическая линия работает по принципу пульсирующего конвейера, т.е. формы с изделиями перемещаются от поста к посту через строго определенное время, необходимое для выполнения самой длительной операции.

При *стендовом* способе производства сборные конструкции изготавливают в стационарных формах. Изделия в процессе их изготовления и до затвердевания бетона остаются на месте, в то время как технологическое оборудование для выполнения отдельных операций последовательно перемещается от одной формы к другой. Стендовый способ применяют при изготовлении изделий большого размера (ферм, балок и т.п.) для промышленного, мостового и гидротехнического строительства.

При *кассетном* способе, являющемся разновидностью стендового, изделия изготавливают в вертикальных формах-кассетах, представляющих

ряд отсеков, образованных стальными стенками. В кассетной установке происходит формование и твердение изделий. Кассетная установка имеет специальные устройства для обогрева изделий паром или электрическим током, что значительно ускоряет твердение бетона. Кассетный способ применяют для массового производства плоских и ребристых тонкостенных изделий (панели внутренних и наружных стен, лестничные марши и т.п.).

**Монолитный железобетон** позволяет создавать разнообразные архитектурные формы и конструктивные решения зданий и сооружений, не ограниченные типоразмерами сборных изделий. Монолитные конструкции сооружают в основном из тяжелого бетона или легкого бетона на пористых заполнителях. Стены жилых домов возводят и из монолитного ячеистого бетона (пенобетона). Арматуру, как правило, изготавливают в арматурно-сварочных цехах и на заводе в виде укрупненных элементов – сварных сеток и блоков-каркасов. Предусматривается автоматизация и комплексная механизация приготовления бетонной смеси, в том числе с помощью мобильных бетоносмесительных установок. При централизованном приготовлении бетонную смесь транспортируют так, чтобы она не расслаивалась (для чего ее постоянно перемешивают в автобетоносмесителях – миксерах), и не допускают изменения состава смеси, прежде всего добавления воды.

*Транспортирование* бетонных смесей на строительной площадке осуществляют бадьями с помощью кранов, транспортерами и по трубам с помощью бетононасосов или пневмонагнетателей. Бетононасосы позволяют подавать бетонные смеси по трубам на расстояние до 150 м и более.

*Бетонирование* монолитных конструкций производят непрерывно или с перерывами, т.е. участками или блоками. Непрерывную укладку бетона осуществляют в том случае, когда требуется повышенная монолитность и однородность бетона, и поэтому нежелательно наличие рабочих швов. Это относится к предварительно напряженным железобетонным конструкциям, фундаментам, воспринимающим динамические усилия от оборудования. Массивные сооружения (плотины, шлюзы, массивные фундаменты и т.п.) разрезают рабочими швами на блоки. Объем блока устанавливают с учетом возникающих в бетоне температурных и усадочных напряжений. Бетонную смесь подают так к месту укладки, чтобы не было расслоения, – по вертикальным рукавам – «хоботам», виброжелобам и наклонным лоткам, при этом высота свободного падения смеси не должна превышать 2 м. Бетонную смесь укладывают слоями, толщину которых устанавливают с учетом ее пластичности и хорошего уплотнения глубинными вибраторами.

*Уход* за бетоном начинают сразу после укладки и уплотнения бетонной смеси и продолжают в течение всего периода выдерживания бетона до достижения им проектной прочности. Качество бетона зависит от ухода за ним, целью которого является создание и поддержание температурно-

влажностных условий, благоприятных для гидратации цемента. В летнее время поверхность свежееуложенного бетона должна быть защищена от высыхания, а в первые часы твердения и от дождя. Для этого открытые горизонтальные поверхности по окончании бетонирования засыпают слоем влагоемкого материала – песка, опилок, шлака или покрывают мешковиной, пленками. В сухую погоду покрытие поддерживают во влажном состоянии до достижения бетоном не менее 70 % проектной прочности.

Для бетонирования в *зимних условиях* в нашей стране разработаны специальные способы, направленные на то, чтобы обеспечить нормальный режим твердения бетона: закрывают его поверхность утеплителем («метод термоса»), подогревают заполнитель и воду, применяют прогрев бетонной смеси, вводят добавки ускорителей и др.

**Сборно-монолитные конструкции** включают в себя заранее изготовленные сборные элементы и дополнительно уложенные на месте строительства монолитный бетон (бетон омоноличивания) и арматуру. После приобретения монолитным бетоном прочности такая конструкция работает как единое целое при обеспечении надежного сцепления нового и старого бетона.

Конструктивное сочетание сборных элементов и монолитного бетона во многих случаях экономически выгодно, так как сборно-монолитные конструкции, объединяя достоинства тех и других, лишены при этом некоторых их недостатков. Для возведения сборно-монолитных конструкций, в отличие от монолитных, не требуется специальной опалубки, подмостей и лесов, а в отличие от сборных – дорогостоящей транспортировки и специального грузоподъемного оборудования.

В сборных элементах сборно-монолитных конструкций весьма эффективно применение предварительно напряженной высокопрочной арматуры. Установкой дополнительной арматуры в опорных участках монолитного бетона сборно-монолитных конструкций обеспечивается надежность соединения элементов.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М. Технология бетона: Учебник. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 500 с.
2. Белов В.В., Петропавловская В.Б. Лабораторные определения свойств строительных материалов: Учебное пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 176 с.
3. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы: Учебник. – М.: Стройиздат, 1986. – 688 с.
4. Козлов В.В. Сухие строительные смеси: Учебное пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 96 с.
5. Максимов С.В., Комохов П.Г., Зверев В.Б. Материалы для конструирования защитных покрытий: Учебное пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 180 с.
6. Попов К.Н., Каддо М.Б., Кульков О.В. Оценка качества строительных материалов: Учебное пособие. – М.: Высшая шк., 2004. – 285 с.
7. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение: Учебное пособие. – М.: Высшая шк., 2002. – 701 с.
8. Строительные материалы: Учебник / Под общей ред. В.Г. Микульского. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 536 с.
9. Технология гидроизоляционных материалов: Учебник / И.А. Рыбьев, А.С. Владычин, Е.П. Казеннова и др.; под ред. И.А. Рыбьева. – М.: Высшая шк., 1991. – 287 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Введение .....	4
1. ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ.....	6
1.1. Состав строительных материалов .....	6
1.2. Структура строительных материалов .....	7
1.3. Основные свойства материалов.....	11
1.3.1. Физические свойства материалов.....	11
1.3.2. Механические свойства строительных материалов .....	15
1.4. Понятие о композиционных материалах.....	18
2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	19
2.1. Горные породы как сырьевая база производства строительных материалов .....	20
2.1.1. Магматические горные породы .....	20
2.1.2. Осадочные горные породы .....	24
2.1.3. Метаморфические горные породы .....	29
2.2. Техногенные вторичные ресурсы .....	30
3. ПРИРОДНЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	36
3.1. Классификация природных каменных материалов .....	36
3.2. Виды и свойства природных каменных материалов.....	38
3.3. Предохранение каменных материалов от разрушения .....	40
4. ОБЖИГОВЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	41
4.1. Керамические материалы и изделия.....	41
4.2. Стекло и изделия из минеральных расплавов.....	44
4.2.1. Стекло и изделия из стекла.....	44
4.2.2. Изделия из минеральных расплавов .....	46
5. МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА .....	46
5.1. Классификация и основные виды минеральных вяжущих .....	46
5.2. Гипсовые и ангидритовые вяжущие вещества .....	47
5.3. Воздушная строительная известь .....	50
5.4. Магнезиальные вяжущие вещества .....	52
5.5. Портландцемент .....	53
5.6. Разновидности портландцемента .....	62
5.7. Многокомпонентные цементы с минеральными добавками и шлаковые цементы .....	64
5.8. Цементы на основе клинкеров специального состава.....	66
6. БЕТОНЫ.....	68
6.1. Общие сведения.....	68
6.2. Материалы для изготовления бетонов .....	68
6.3. Бетонная смесь .....	72
6.4. Структура и свойства тяжелого бетона .....	74

6.5. Подбор состава тяжелого бетона .....	77
6.6. Специальные виды тяжелых бетонов .....	79
6.7. Легкие и особо легкие бетоны .....	81
6.8. Железобетон .....	88
7. СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАСТВОРЫ .....	89
7.1. Основные понятия и классификация .....	89
7.2. Свойства растворов .....	90
7.3. Сухие строительные смеси .....	91
8. СИЛИКАТНЫЕ ИЗДЕЛИЯ АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ .....	93
9. МЕТАЛЛЫ И ИЗДЕЛИЯ ИЗ НИХ .....	94
9.1. Общие сведения .....	94
9.2. Основные виды и марки сталей, применяемых в строительстве ...	99
9.3. Основные виды металлических изделий для строительства .....	101
9.4. Защита металлов от коррозии .....	101
10. МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ .....	102
10.1. Общие сведения .....	102
10.2. Свойства древесины .....	104
10.3. Лесоматериалы и изделия из древесины .....	109
11. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ .....	109
11.1. Битумные и дегтевые вяжущие .....	110
11.2. Асфальтовые бетоны и растворы .....	114
11.3. Полимерные материалы и изделия .....	125
11.4. Модификация строительных материалов полимерами .....	131
12. ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ И КРОВЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	135
12.1. Кровельные и гидроизоляционные материалы на основе битумов и дегтей .....	135
12.2. Кровельные и гидроизоляционные материалы на основе полимеров .....	140
13. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	142
13.1. Классификация и основные требования .....	142
13.2. Неорганические теплоизоляционные материалы и изделия .....	145
13.3. Органические теплоизоляционные материалы и изделия .....	148
14. АКУСТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ .....	150
14.1. Звукопоглощающие материалы .....	150
14.2. Звукоизоляционные материалы .....	152
15. ОТДЕЛОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	153
15.1. Общие сведения .....	153
15.2. Лакокрасочные материалы .....	154
15.3. Материалы на основе древесины и продуктов ее переработки ....	158
15.4. Отделочные каменные материалы .....	159
15.5. Отделочные материалы из керамики, стекла, металла .....	160
15.6. Отделочные материалы на основе полимеров .....	160

16. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	162
16.1. Общие принципы получения строительных материалов .....	162
16.2. Основы технологии бетона и железобетона .....	169
16.3. Изготовление сборных и монолитных железобетонных конструкций .....	174
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	177

**Владимир Владимирович Белов**  
**Виктория Борисовна Петропавловская**

**КРАТКИЙ КУРС МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ  
И ТЕХНЕОЛОГИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА**

Учебное пособие  
Издание второе

Редактор В.А. Румянцева  
Корректор Е.В. Маняшина  
Технический редактор Г.В. Комарова

---

Подписано в печать 10.08.05

Формат 60 x 84 / 16

Физ. печ. л. 11,25

Тираж 150 экз.

Усл. печ. л. 10,46

Заказ № 143

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 9,79

Цена 99 руб. 10 коп.

---

Издательство Тверского государственного технического университета  
170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22