

Г. И. ГОРЧАКОВ, Ю. М. БАЖЕНОВ

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Допущено*

*Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебника для студентов  
строительных специальностей  
высших учебных заведений*



МОСКВА СТРОИЗДАТ 1986

**БИБЛИОТЕКА**  
Херсон. а/го с/х х-го  
им. Г. Мушкетера  
№ 2

ББК 38.3  
Г 79  
УДК 691(075.9)

Рецензенты: кафедра дорожно-строительных материалов  
Харьковского автомобильно-дорожного института (д-р техн.  
наук, проф. И. М. Грушко); д-р техн. наук, проф. Б. В. Гу-  
сев (НИИЖБ)

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Строительные материалы» в учебном плане подготовки инженеров-строителей является базисным для дисциплин: архитектуры, технологии строительного производства, железобетонных и металлических конструкций, конструкций из дерева и пластмасс, экономики и организации строительства. Учебник написан применительно к программе дисциплины «Строительные материалы» для строительных специальностей вузов.

Текст изложен с учетом основных направлений научно-технического прогресса в области строительных материалов, опирающийся на последние достижения науки и техники.

рассмотрены процессы твердения вяжущих веществ. Используются новейшие данные, содержащиеся в трудах VI Московского и VII Парижского международных конгрессов по химии цемента.

С целью успешного осуществления Продовольственной программы СССР в учебнике представлены местные строительные материалы, которые могут быть эффективно применены при возведении сельскохозяйственных комплексов, животноводческих помещений, элеваторов и других зданий и сооружений.

В учебник введена глава, посвященная металлическим материалам и изделиям из них, поскольку программой предусмотрено ее изучение в дисциплине «Строительные материалы».

Впервые кратко даны элементы теории композиционных материалов, так как многие строительные материалы (асбестоцемент, стеклопластики, бетонополимер и др.) по своей структуре относятся к композитам. Их изучение на основе этой теории необходимо для усвоения принципов создания новых материалов с улучшенными физико-механическими свойствами. Представлены новые виды теплоизоляции, необходимые для снижения расхода топлива и уменьшения потерь энергии при эксплуатации зданий, промышленного оборудования и трубопроводов, а также новые эффективные теплоизоляционные материалы: минераловатные твердые плиты на синтетическом связующем, стеклопор, пенопласты, наполненные

## ВВЕДЕНИЕ

Промышленность строительных материалов является отраслью народного хозяйства, от которой зависит экономический потенциал страны.

В. И. Ленин указывал: «Одним из необходимых условий роста крупной машинной индустрии (и чрезвычайно характерным спутником ее роста) является развитие промышленности, дающей топливо и материалы для построек, и строительной промышленности»<sup>1</sup>.

В двенадцатой пятилетке предусматривается дальнейшее увеличение объема производства строительных материалов, строительных конструкций и деталей, преимущественное развитие производства изделий, обеспечивающих снижение материалоемкости, стоимости и трудоемкости строительства, уменьшение веса зданий и сооружений и повышение их тепловой защиты. В связи с этим разрабатываются технологии производства строительных материалов с использованием золы и шлаков ТЭС, металлургических и фосфорных шлаков, отходов горно-добывающей промышленности и углеобогажительных фабрик. Для экономии топливно-энергетических ресурсов переводится на энергосберегающие технологии предприятия по производству цемента, извести, стекла, железобетонных и керамических изделий. Например, развивается сухой способ производства портландцемента, сокращающий затраты энергии в 1,5—2 раза по сравнению с мокрым способом.

Основной задачей в капитальном строительстве является повышение эффективности капитальных вложений на базе индустриализации, означающей перевод строительства на непрерывный процесс комплексной механизированной сборки зданий и сооружений из укрупненных готовых конструкций заводского изготовления.

Затраты на материалы составляют более половины общей стоимо-

сборного железобетона, асбестоцементных листовых материалов и труб, оконного стекла.

Большие объемы изготовления монолитного бетона и сборного железобетона потребовали увеличения выпуска и улучшения качества щебня, гравия и песка. Производство нерудных материалов в 1980 г. достигло 970,6 млн. м<sup>3</sup>. Возникла новая отрасль промышленности — производство искусственных пористых заполнителей для легких бетонов (в 1980 г. получено 37 млн. м<sup>3</sup>). Созданы крупные предприятия по изготовлению плотных и нежных силикатных материалов автоклавного твердения.

В 1984 г. было произведено 154 млн. т стали, выпуск проката черных металлов составил 107 млн. т. Расширена номенклатура прокатных изделий и арматурной стали.

Резко повысился уровень производства керамических изделий. Освоен выпуск разных видов эффективного кирпича, керамических блоков, фаянсовых облицовочных керамических плит и панелей.

Получила широкое развитие промышленность рулонных кровельных и гидроизоляционных материалов. В 1980 г. было изготовлено 1723 млн. м<sup>2</sup> мягкой кровли.

В больших объемах производится теплоизоляционные материалы: минеральная вата и изделия из нее, газосиликат и газобетон, материалы для высокотемпературной изоляции с применением вспученных вермикулита и перлита. Выпуск минераловатных изделий в 1980 г. составил 21,5 млн. м<sup>3</sup>.

Освоено производство крупноразмерных асбестоцементных листов для стен и кровель, высококапярных асбестоцементных труб.

В нашей стране больше, чем в какой-либо другой, производится листового стекла. В 1980 г. его было выпущено 245 млн. м<sup>2</sup>. Получило развитие производство витринного, армированного и теплопоглощающего стекла, стеклянных труб, блоков, пеностекла, стекольной ваты.

Созданы крупные предприятия, выпускающие строительные изделия из пластмасс. На основе полимеров изготавливают санитарно-техническое оборудование, различные материалы для теплоизоляции, гидроизоляции, устройства чистых полов и других целей. Синтетические смолы широко используются также в производстве клеев и лакокрасочных материалов взамен природных смол и растительных масел.

Успехи промышленности строительных материалов объясняются не только созданием крупной сети предприятий, но и осуществлением комплексной механизации производства, внедрением автоматических устройств, интенсификацией технологических процессов.

Труды русских и советских ученых по химии силикатов, технологии цемента, силикатного бетона, сборного железобетона, керамики, стекольному делу получили международное признание. Еще в XIX и начале XX в. работы русских ученых Н. А. Белевского, Н. Н. Лямия, И. Г. Малюги, А. Р. Шуляченко оказали большое влияние на развитие отечественной науки о строительных материалах.

Благодаря трудам академиков Д. С. Беллинкина, Ф. Ю. Леванов-Лесгина, В. А. Обручева, А. Ф. Завьялова, профессоров

веществах получило в работах П. П. Боженова, П. П. Будникова, Ю. М. Бутта, А. В. Волженского, С. И. Дружинина, В. Ф. Журавлева, В. А. Кива, О. П. Мчедлова-Петросова, И. А. Торпова и др. Труды И. П. Александрова, Н. М. Велькева, К. С. Заирова, Б. Г. Скрябинцева и Н. А. Попова способствовали внедрению в практику научных методов определения состава бетона — особенно легкого, высокоупорного, жаростойкого. Теория прочности и технологии бетона получили развитие в работах И. И. Ахмедова, Ю. М. Баженова, О. Я. Берга, С. А. Миронова, И. А. Рыбька и др.

Общая фундаментальная теория коррозии бетона и железобетона разработана в трудах В. М. Москвина, С. Н. Алексеева, В. И. Бабушкина, Г. И. Горнакова, Ф. М. Иванова, В. Р. Ратнова, О. В. Кунченко, С. В. Шестопорова и др. На ее основе созданы долговечные железобетонные конструкции для массового строительства.

Развитию строительной керамики в большой мере способствовали исследования П. А. Землянского, А. И. Августовича, П. П. Будникова и других ученых. Они разработали теоретические основы гонимоведения, раскрыли процессы, происходящие при тепловой обработке глины, подробно изучили глины нашей страны.

За годы Советской власти промышленность строительных материалов и изделий превратилась в крупную отрасль индустрии, располагающую механизированными и автоматизированными предприятиями, квалифицированными кадрами и крупной научной базой.

## § 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Строительная конструкция воспринимает те или иные нагрузки и подвергается действию окружающей среды. Поэтому строительные материалы должны обладать определенной прочностью, а также способностью сопротивляться физическим и химическим воздействиям среды: воздуха и содержащихся в нем паров и газов, воды и растворенных в ней веществ, колебаниям температуры и влажности, совместно воды и мороза при многократном замораживании и оттаивании.

Исходя из условий работы материалов в сооружении их можно разделить по назначению на две группы.

Первую группу составляют конструкционные материалы, применяемые для несущих конструкций: 1) природные каменные материалы; 2) неорганические и органические вяжущие вещества; 3) искусственные каменные материалы: а) получаемые на основе вяжущих веществ (бетоны, железобетон, строительные растворы); б) получаемые термической обработкой минерального сырья (керамические материалы и изделия, стекло, ситаллы); в) металлы (сталь, чугун, алюминий, сплавы); 4) полимеры; 5) древесные материалы; 6) композиционные материалы (асбестоцемент, бетонополимер, фибробетон, стеклопластики и др.).

Вторая группа объединяет строительные материалы специального назначения, необходимые для защиты конструкций от вредных воздействий среды, а также для повышения эксплуатационных свойств и создания комфорта: 1) теплоизоляционные; 2) акустические; 3) гидроизоляционные, кровельные и герметизирующие; 4) отделочные; 5) антикоррозионные; 6) огнеупорные; 7) материалы для защиты от радиационных воздействий.

### I. Стандартизация свойств

Чтобы правильно выбрать материал, спроектировать и построить сооружение, надо хорошо знать свойства применяемых материалов.

В строительстве применяют много материалов с различными свойствами, однако существуют основные свойства, важные для всех строительных материалов. К та-

ким свойствам можно отнести: плотность, пористость, прочность, деформируемость и стойкость в эксплуатационных условиях. Указанные свойства определяют качество материала и возможность его применения в той или другой конструкции.

Свойства материала всегда оценивают числовыми показателями, которые устанавливают путем испытаний. Для получения сопоставимых данных, которыми можно воспользоваться при расчете конструкций, испытания обязательно проводят единообразно, как установлено государственными общесоюзными стандартами (ГОСТами).

В СССР создана единая государственная система стандартизации, которая применяется во всех отраслях народного хозяйства. Этим самым создается эффективность действия стандартов как одного из средств ускорения научно-технического прогресса и повышения качества продукции.

Система органов и служб стандартизации представлена общесоюзным органом по стандартизации (Государственным комитетом стандартов Совета Министров СССР) и его службами — службой стандартизации в отраслях народного хозяйства, службой стандартизации в союзных республиках. В зависимости от сферы действия стандарты могут быть государственными (ГОСТ), отраслевыми (ОСТ), республиканскими (РСТ) и стандартами предприятий (СТП).

*Государственные стандарты* — это обязательный документ для всех предприятий, организаций и учреждений, независимо от их ведомственной подчиненности, во всех отраслях народного хозяйства СССР и союзных республик. Такие стандарты утверждает Госстандарт, а стандарты в области строительства и строительных материалов — Государственный комитет СССР по делам строительства (Госстрой СССР). Особо важные государственные стандарты (по специальному перечню) утверждает Совет Министров СССР.

В области строительных материалов и изделий наиболее распространены стандарты: технических условий; технических требований; типов изделий и их основных параметров, методов испытаний; правил приемки, маркировки, упаковки, транспортирования и хранения.

*Стандарты технических требований* нормируют показатели качества, надежности и долговечности продукции,

ТАБЛИЦА 1.1. РАЗМЕРЫ ПРОИЗВОДНЫХ МОДУЛЕЙ МКРС

Обозначение	Размер, мм	Обозначение	Размер, мм
Укрупненные		Дробные	
1М	100	1/10М	100
2М	200	1/2М	50
3М	300	1/3М	20
6М	600	1/6М	10
12М	1200	1/12М	5
15М	1500	1/15М	2
30М	3000	1/30М	1
60М	6000		

ее внешний вид. Вместе с тем такие стандарты устанавливают гарантийный срок службы и комплектность поставок изделий. Большинство стандартов на строительные материалы и изделия — это стандарты технических требований. Значительная часть требований стандартов связана с физико-механическими характеристиками материалов (плотностью, водопоглощением, влажностью, прочностью, морозостойкостью и др.).

Одна из особенностей государственной системы стандартизации в строительстве и технологии строительных изделий состоит в том, что кроме стандартов здесь действует система нормативных документов, объединенная в *Строительные нормы и правила* (СНИП). СНИП — это свод общесоюзных нормативных документов по проектированию, строительству и строительным материалам, обязательный для всех организаций и предприятий.

Методическую основу стандартизации размеров в проектировании, изготовлении строительных изделий и при возведении сооружений составляет *Модульная координация размеров в строительстве* (МКРС), представляющая собой совокупность правил координации размеров элементов зданий и сооружений, строительных изделий и оборудования на базе основного модуля, равного 100 мм (обозначается 1М). Применение МКРС позволяет унифицировать и сократить число типоразмеров строительных изделий из разных материалов или отличающихся по конструкции. Изделия и детали одинаковых типоразмеров, изготовленные в соответствии с требованиями МКРС могут быть использованы в зданиях разнообразного назначения.

В МКРС входят и произвольные модули, которые получают путем умножения основного модуля на целые или дробные коэффициенты. При умножении на целые коэффициенты образуются укрупненные модули, а при умножении на коэффициенты менее единицы — дробные модули (табл. 1.1).

Производные укрупненные модули (60М, 30М, 12М) и кратные им размеры рекомендуются для назначения продольных и поперечных шагов зданий. Модули 6М, 3М, 2М предназначены для членения конструктивных элементов в плане зданий и для назначения ширины проемов. Основной модуль 1М и дробные модули от 1/2М до 1/20М применяют для назначения размеров сечения относительно малых элементов (колонн, балок и

т. д.). Наиболее мелкие дробные модули (от 1/10М до 1/100М) используют для назначения различной толщины плитных и листовых материалов, ширины зазоров, допусков.

Созданные в СССР Строительные нормы и правила имеют большое международное значение. Решением постоянной комиссии СЭВ по строительству СНИП взят за основу унифицированных норм и правил в области строительства для всех стран — членов СЭВ.

Работы по стандартизации в интернациональном масштабе проводятся специально созданной в 1947 г. Международной организацией по стандартизации (ИСО). Деятельность ИСО, как указано в ее уставе, имеет целью содействовать благоприятному развитию стандартизации во всем мире, чтобы облегчить международный обмен товарами и развивать взаимное сотрудничество в области науки, техники и экономики. Кроме ИСО, активную работу в области стандартизации и социалистической экономической интеграции проводят Совет Экономической Взаимопомощи и его Международный институт по стандартизации.

## 2. Связь состава, структуры и свойств

Строительный материал характеризуется химическим, минеральным и фазовым составом.

*Химический состав* строительных материалов позволяет судить о некоторых их свойствах: огнестойкости, биостойкости, механических и других технических характеристиках. Химический состав неорганических вяжущих веществ (цемента, извести и др.) и каменных материалов удобно выражать количеством содержащихся в них оксидов. Основные и кислотные оксиды химически связаны между собой и образуют минералы, которые и определяют многие свойства материала.

*Минеральный состав* показывает, какие минералы и в каком количестве они содержатся в вяжущем веществе или в каменном материале. Например, в поргланцементе содержание трехкальцевого силиката ( $3\text{CAO} \cdot \text{SiO}_2$ ) составляет 45—60 %, причем при большем его количестве ускоряется его твердение, повышается прочность цементного камня.

*Фазовый состав* материала и фазовые переходы воды, находящейся в его порах, оказывают влияние на все свойства и поведение материала при эксплуатации. В материале выделяют твердые вещества, образующие стенки пор, т. е. «каркас» материала, и поры, заполненные воздухом и водой. Если вода, являющаяся компонентом этой системы, замерзает, то образовавшийся в порах лед изменяет механические и теплотехнические свойства материала. Увеличение же объема замерзающей в порах воды вызывает в материале внутренние напряжения, способные его разрушить при повторных циклах замораживания и оттаивания.

Структуру материала изучают на трех уровнях: первый — макроструктура материала — строение, видимое невооруженным глазом; второй — микроструктура материала — строение, видимое в оптический микроскоп; третий — внутреннее строение веществ, составляющих материал, на молекулярно-ионном уровне, изучаемом методами рентгено-структурного анализа, электронной микроскопии и т. д.

*Макроструктура* твердых строительных материалов может быть конгломератная, ячеистая, мелкопористая, волокнистая, слоистая, рыхлозернистая (порошкообразная).

*Искусственные конгломераты* — это обширная группа, объединяющая различные виды бетона, некоторые керамические и другие материалы.

*Ячеистая структура* характеризуется наличием макропор, свойственных газо- и пенобетонам, ячеистыми пластмассам.

*Мелкопористая структура* свойственна, например, керамическим материалам, поризованным способами высокого затворнения водой и зведением выгорающих добавок.

*Волокнистая структура* присуща древесине, стеклопластикам, изделиям из минеральной ваты и др. Особенность этой структуры — резкое различие прочности, теплопроводности и других свойств вдоль и поперек волокон.

*Слоистая структура* отчетливо выражена у рудонных, листовых, плитных материалов, в частности у водонепроницаемых материалов со слоистым наполнителем (бумпласта, текстолита и др.).

*Рыхлозернистая структура* свойственна наполнителям для бетона, зернистым и порошкообразным материалам для мастичной теплоизоляции, засыпок и др.

Структура вещества, составляющих материал, может быть *кристаллическая* и *аморфная*. Кристаллические и аморфные формы нередко являются лишь различными состояниями одного и того же вещества (например, кристаллический кварц и различные аморфные формы кремнезема). Кристаллическая форма всегда более устойчива. Чтобы вызвать химическое взаимодействие между кварцевым песком и известью, в технологии силикатного кирпича применяют автоклавную обработку отформованного сырья насыщенным водяным паром с температурой 175°C и давлением 0,8 МПа. Между тем, трепел (аморфная форма  $\text{SiO}_2$ ) вместе с известью после затворнения водой образует гидросиликат кальция при температуре 15—25°C. Аморфная форма вещества может перейти в более устойчивую кристаллическую форму.

Практическое значение для природных и искусственных каменных материалов имеет явление полиморфизма, когда одно и то же вещество способно существовать в различных кристаллических формах, называемых *модификациями*. Наблюдаются, например, полиморфные превращения кварца, сопровождающиеся изменением объема.

Особенностью кристаллического вещества являются определенная температура плавления (при постоянном давлении) и определенная геометрическая форма кристаллов каждой его модификации.

Свойства монокристаллов неодинаковы в разных направлениях. Это механическая прочность, теплопроводность, скорость растворения, электропроводность и др. Явление анизотропии является следствием особенностей внутреннего строения кристаллов.

В строительстве применяют поликристаллические каменные материалы, в которых разные кристаллы ориентированы беспорядочно. Подобные материалы рассматриваются как изотропные по своим строительно-техническим свойствам. Исключения составляют слонстые каменные материалы (гнейсы, сланцы и др.).

*Внутреннее строение веществ*, составляющих материал, определяет его механическую прочность, твердость, тугоплавкость и другие важные свойства.

Кристаллические вещества, входящие в состав строительного материала, различают по характеру связи между частицами, образующими пространственную кристаллическую решетку. Она может быть образована: нейтральными атомами (одного и того же элемента, как в алмазе С или разных элементов, как в кварце  $\text{SiO}_2$ ); ионами (разноименно заряженными, как в кальците  $\text{CaCO}_3$ , или одноименными, как в металлах); цепи

ма разнообразны. Кальцит  $\text{CaCO}_3$  при достаточно высокой прочности обладает малой твердостью. Показатели прочности и твердости полевых шпатов довольно высокие, хотя и уступают кристаллам алмаза с чисто ковалентной связью.

*Молекулярные кристаллические решетки* и соответствующие им молекулярные связи образуются преимущественно в кристаллах тех веществ, в молекулах которых связи ковалентные. Кристалл этих веществ построен из целых молекул, которые удерживаются друг около друга сравнительно слабыми ван-дер-ваальсовыми силами межмолекулярного притяжения (как в кристаллах льда). При нагревании связи между молекулами легко разрушаются, поэтому вещества с молекулярными решетками обладают низкими температурами плавления.

*Силикаты*, занимающие особое место в строительных материалах, имеют сложную структуру, обусловившую их особенности. Так, волокнистые минералы (асбест) состоят из параллельных силикатных цепей, связанных между собой положительными ионами, расположенными между цепями. Ионные силы слабее ковалентных связей внутри каждой цепи, поэтому механические воздействия, недостаточные для разрыва цепей, разделяют такой материал на волокна. Пластинчатые минералы (слюда, каолинит) состоят из силикатных групп, связанных в плос-



ва  $\rho_0$  при определенных физических условиях (безразмерная величина)

$$d = \frac{\rho(T_1; \rho_1)}{\rho_0(T_0; \rho_0)} \quad (1.2)$$

В качестве стандартного вещества удобно принять воду при 4°C (точнее при 3,98°C), имеющую при этой температуре плотность 1000 кг/м<sup>3</sup>, или 1 г/см<sup>3</sup>. Тогда, например, легкий бетон плотностью 1400 кг/м<sup>3</sup> имеет относительную плотность  $d=1,4$ . Относительная плотность материалов входит в ряд формул (формула В. П. Некрасова для расчета теплопроводности, выражение для вычисления коэффициента конструктивного качества).

Удельный вес  $\gamma$ , Н/м<sup>3</sup> — отношение веса тела  $G$  к объему  $V$

$$\gamma = G/V \quad (1.3)$$

Масса является скалярной величиной и не зависит от ускорения свободного падения, а вес пропорционален этому ускорению [равен  $mg$  и, как всякая сила, является вектором и измеряется в ньютонах (Н)]. Удельный вес и плотность связаны соотношением  $\gamma = \rho g$ .

Объем пористого материала в естественном состоянии (т. е. вместе с заключенными в нем порами)  $V_e$  состоит из объема твердого вещества  $V_a$  и объема пор  $V_p$  (рис. 1.1), которые могут заполняться воздухом и водой:

$$V_e = V_a + V_p$$

Перед определением объема пор пробу материала высушивают в сушильном шкафу при температуре 105°C до постоянной массы, т. е. до полного удаления гигроскопической влаги. Подготовленную пробу помещают в герметически закрытый сосуд, из которого откачивают воздух, и в вакууме насыщают материал жидкостью.

Объем жидкости, полностью заполнившей поровое пространство материала, равен объему пор в пробе материала  $V_p$ . В качестве замещающей жидкости применяют воду и керосин (для цементных материалов). Для точных измерений объема пор используют сжиженный гелий, при этом учитывают его сверхтекучесть и способность проникать в тонкие поры. Зная объем материала в естественном состоянии  $V_e$  и определив объем заключающийся в нем пор, находят объем, занимаемый веще-

ством:  $V_a = V_e - V_p$ , затем вычисляют плотность по формуле (1.1).

Стандартный метод определения плотности и пористости материалов (бетона, кирпича и др.) предусматривает измельчение предварительно высушенной пробы в порошок, проходящий через сетку с отверстиями 0,125 мм. Абсолютный объем  $V_a$  навески  $m$  порошка измеряют с помощью пикнометра; его принимают равным объему вытесненной порошком жидкости. Истинную плотность вычисляют также по формуле (1.1).

Средняя плотность (в последующем изложении — плотность)  $\rho_m$ , г/см<sup>3</sup> — масса единицы объема материала в естественном состоянии (объем  $V_e$  определяется вместе с порами):

$$\rho_m = m/V_e \quad (1.4)$$

Значения плотности данного материала в сухом  $\rho_m$  и влажном  $\rho_{mв}$  состояниях связаны соотношением

$$\rho_m = \rho_{mв} / (1 + W_m) \quad (1.5)$$

где  $W_m$  — количество воды в материале (доля от его массы).

Плотность пористых материалов всегда меньше их истинной плотности. Например, плотность легкого бетона 500—1800 кг/м<sup>3</sup>, а его истинная плотность 2600 кг/м<sup>3</sup>. Плотность строительных материалов колеблется в очень широких пределах: от 15 (пористая пластмасса — минипра) до 7850 кг/м<sup>3</sup> (сталь). Основные физические свойства распространенных строительных материалов даны в табл. 1.2.

Насыпная плотность  $\rho_n$  — масса единицы объема рыхло насыпанных зернистых или волокнистых материалов (цемента, песка, гравия, щебня, гранулированной минеральной ваты и т. п.). Например, истинная плотность известняка 2700 кг/м<sup>3</sup>, его плотность 2500 кг/м<sup>3</sup>, а насыпная плотность известнякового щебня 1300 кг/м<sup>3</sup>. По-

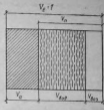


Рис. 1.1. Схема составных частей пористого материала

$V_a$  — абсолютный объем;  $V_e$  — объем в естественном состоянии (с порами);  $V_{вод}$  — объем воды;  $V_{воз}$  — объем воздуха;  $V_m$  — объем пор

ТАБЛИЦА 1.2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ (В ВОЗДУШНО-СУХОМ СОСТОЯНИИ)

Наименование материала	Истинная плотность, $\rho_{\text{ист}}$ , г/см <sup>3</sup>	Средняя плотность, $\rho_{\text{ср}}$ , г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Температурное расширение, $\beta_{\text{т}}$ , 1/(м·°С)
Бетон:				
тяжелый	2,6	2,4	10	1,16
легкий	2,6	1	61,5	0,35
ячеистый	2,6	0,5	81	0,2
Кирпич:				
обыкновенный	2,65	1,8	32	0,8
пустотелый	2,65	1,3	51	0,55
Природный камень:				
гранит	2,7	2,67	1,4	2,8
вулканический туф	2,7	1,4	52	0,5
Стекло:				
оконное	2,65	2,65	0	0,58
тепlostекло	2,65	0,3	88	0,11
Полимерные материалы:				
стеклопластик	2	2	0	0,5
мипора				
(искусственный полимер)	1,2	0,015	98	0,03
Деревянные материалы:				
сосновые доски	1,53			

для вычисления пористости, % (1.7), полученную путем преобразования формулы (1.6):

$$P = \left(1 - \frac{\rho_{\text{ист}}}{\rho}\right) 100. \quad (1.7)$$

Пористость строительных материалов колеблется в широких пределах: от 0 до 98 % (см. табл. 1.2).

Коэффициент плотности  $K_{\text{пл}}$  — степень заполнения объема материала твердым веществом:

$$K_{\text{пл}} = \rho_{\text{ист}}/\rho. \quad (1.8)$$

В сумме  $P + K_{\text{пл}} = 1$  (или 100 %), т. е. высушенный материал можно представить состоящим из твердого каркаса, обеспечивающего прочность, и воздушных пор.

Открытая пористость  $P_{\text{от}}$  равна отношению суммарного объема всех пор, насыщающихся водой, к объему материала  $V_{\text{с}}$ :

$$P_{\text{от}} = \frac{m_2 - m_1}{V_{\text{с}}} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}. \quad (1.9)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — масса образцов соответственно в сухом и насыщенном водой состоянии.

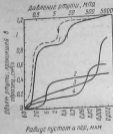


Рис. 1.2. Интегральные кривые (1—4) распределения пор по размерам (пунктиром показана кривая гистерезиса)

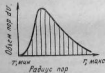


Рис. 1.3. Дифференциальная кривая распределения пор по радиусам

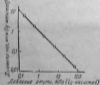


Рис. 1.4. График зависимости между давлением ртути (в портере) и размером пор

оценить форму пор. Ртуть не смачивает большинство неорганических строительных материалов и проникает в поры лишь под действием приложенного давления; при повышении давления ртуть проникает в более мелкие поры, что видно из следующего уравнения:

$$pr = -4\theta \cos \theta, \quad (1.11)$$

где  $p$  — прилагаемое давление;  $d$  — диаметр пор;  $\theta$  — краевой угол смачивания ртути и анализируемого материала.

Уравнение показывает, что при нулевом избыточном давлении несмачивающая жидкость не будет проникать в поры. Диаметр пор для определенного давления получают из приведенного уравнения, правая часть которого для данного материала — величина постоянная. На рис. 1.4 дано соотношение между давлением ртути и диаметром пор.

Как указывалось, интегральные кривые распределения пор по их размерам приведены на рис. 1.2 для четырех различных материалов; по оси  $x$  отложены радиусы пор, по оси  $y$  — объем пор данного размера (он равен объему заполняющей их ртути). Кривая 1 характерна для материалов с большим объемом крупных пустот (размером более 10 мкм). Гистерезис (на кривой 1) показывает, что поры имеют «бутылочную» форму и неко-

торый объем ртути в них остается после снятия давления. Кривая 2 для порошка с большим объемом пустот (4—6 мкм) между зернами. Кривая 3 для материала с мелкой пористостью, кривая 4 для материала с однородной структурой пор 0,02—0,04 мкм.

В современных порометрах измерение пористости автоматизировано и результат выдается в готовом виде в цифровой и графической формах.

Дифференциальная кривая распределения объема пор  $V_p$  по их размерам (см. рис. 1.3) соответствует равенству

$$\frac{dV_p}{dr} = f_V(r),$$

где  $\frac{dV_p}{dr}$  — тангенс угла наклона касательной к интегральной кривой.

Площадь под дифференциальной кривой (на рис. 1.3 заштрихована) равна суммарному объему пор в единице объема материала.

Удельную поверхность порового пространства вычисляют, используя средний условный радиус пор, или определяют прямыми адсорбционными методами (по адсорбции водяного пара, азота и другого инертного газа).

Удельная поверхность  $S$ ,  $\text{см}^2/\text{г}$ , пропорциональна массе  $m$  адсорбированного водяного пара (или газа), необходимой для полного покрытия мономолекулярным слоем всей внутренней поверхности пор (в г на 1 г сухого материала):

$$S = \frac{a_1 N}{M} n, \quad (1.12)$$

где  $a_1$  — поверхность, покрываемая одной адсорбированной молекулой; для молекулы воды  $a_1 = 10,6 \cdot 10^{-16}$   $\text{см}^2$ ;  $N = 6,06 \cdot 10^{23}$  — число Авогадро;  $M$  — молекулярная масса адсорбированного газа (для водяного пара  $M = 18$ ).

Все свойства материала определяются его составом и строением и прежде всего величиной и характером пористости. Это видно из данных табл. 1.2, в которой попарно сопоставлены плотные и пористые материалы, имеющие в основном общий химический состав.

## 2. Гидрофизические свойства

Гигроскопичностью называют свойство капиллярно-пористого материала поглощать водяной пар из воздуха.

Поглощение влаги из воздуха обусловлено полимолекулярной адсорбцией водяного пара на внутренней поверхности пор и капиллярной конденсацией. Этот физико-химический процесс называется сорбцией, причем он обратим. Древесина, теплоизоляционные, стеновые и другие пористые материалы обладают развитой внутренней поверхностью пор и поэтому высокой сорбционной способностью.

**Сорбционная влажность** характеризует способность материала поглощать пары воды из окружающего воздуха. Численно она равна влажности материала (по массе или объему) после окончания поглощения им водяного пара. С повышением давления водяного пара (т. е. с увеличением относительной влажности воздуха при постоянной температуре) возрастает сорбционная влажность материала (рис. 1.5).

Согласно уравнению Фрейндлиха, количество адсорбированного газа

$$a = \delta p^{1/n}, \quad (1.13)$$

где  $p$  — давление газа при достижении равновесия;  $\delta$  и  $n$  — эмпирические параметры, постоянные для данных адсорбента и газа при определенной температуре.

В логарифмических координатах это уравнение выражается отрезком прямой:

$$\lg a = \lg \delta + \frac{1}{n} \lg p.$$

Кривая, выражающая зависимость количества адсорбируемого газа от давления, после насыщения внутренней поверхности пор стремится к прямой, параллельной оси абсцисс (см. точку  $A$  на рис. 1.5).

Дальнейшее увеличение гигроскопической влажности материала происходит вследствие капиллярной конденсации. В узких капиллярах материала, который хорошо смачивается водой (древесина, кирпич, бетон и т. п.), мениск всегда будет вогнутым и давление насыщенного пара под ним будет ниже, чем над плоской поверхностью. В результате пар, не достигший давления насыщения по отношению к плоской поверхности, может быть перенесенным по отношению к жидкой фазе в тонких капиллярах и будет конденсироваться в них. Вследствие процессов адсорбции и капиллярной конденсации водяного пара из атмосферы влажность пористых материалов

даже после их длительной выдержки на воздухе достаточно велика. Так, равновесная влажность воздушной-сухой древесины составляет 12—18% по массе, стеновых материалов — 5—7% по массе. Увлажнение сильно увеличивает теплопроводность ограждающих конструкций и теплоизоляции, поэтому стремятся предотвратить увлажнение, например, покрывая утеплитель гидроизоляционной пленкой.

**Капиллярное всасывание** воды пористым материалом происходит, когда часть конструкции находится в воде. Так, грунтовые воды могут подниматься по капиллярам и увлажнять нижнюю часть стены здания. Чтобы не было сырости в помещении, устраивают гидроизоляционный слой, отделяющий фундаментную часть конструкции стены от ее надземной части.

Капиллярное всасывание характеризуется высотой поднятия уровня воды в капиллярах материала, количеством поглощенной воды и интенсивностью всасывания.

Высоту  $h$  поднятия жидкости в капилляре определяют по формуле Жюренга:

$$h = 2\sigma \cos \theta / (r\rho g), \quad (1.14)$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение;  $\theta$  — краевой угол смачивания;  $r$  — радиус капилляра;  $\rho$  — плотность жидкости;  $g$  — ускорение свободного падения.

Поры в бетоне и других материалах имеют неправильную форму и изменяющееся поперечное сечение, поэтому приведенная формула годна лишь для качественного рассмотрения явления; высоту всасывания водом определяют по методу «меченых атомов» либо по изменению электропроводности материала.

Объем воды, поглощенный материалом путем капиллярного всасывания за время  $t$ , в начальной стадии подчиняется параболическому закону:

$$V^2 = Kt, \quad (1.15)$$

где  $K$  — константа всасывания.

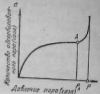


Рис. 1.5. Изотерма адсорбции (для  $P > P_A$  круто повышается влажность капиллярной конденсацией)

Уменьшение интенсивности впитывания (т. е. значения  $K$ ) отражает улучшение структуры материала (например, бетона) и повышение его морозостойкости.

**Водопоглощение пористых материалов** (бетона, кирпича и др.) определяют по стандартной методике, выдерживая образцы в воде с температурой  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Водопоглощение, определяемое погружением образцов материала в воду, характеризует в основном открытую пористость. Например, пористость легкого бетона может быть 50—60 % объема, а его водопоглощение составляет 20—30 % объема. Водопоглощение определяют по объему и массе.

Водопоглощение по объему  $W_o$ , % — степень заполнения объема материала водой:

$$W_o = (m_n - m_c) / V_e \quad (1.16)$$

где  $m_n$  — масса образца материала, насыщенного водой, г;  $m_c$  — масса образца в сухом состоянии, г.

Водопоглощение по массе  $W_M$ , %, определяют по отношению к массе сухого материала:

$$W_M = \frac{m_n - m_c}{m_c} \cdot 100 \quad (1.17)$$

Разделив  $W_o$  на  $W_M$ , получим

$$W_o = W_M d \quad (1.18)$$

Относительную плотность сухого материала  $d$  выражают по его отношению к плотности воды (безразмерная величина).

Диэлькометрический и нейтронный методы измерения влажности применяют преимущественно для сыпучих материалов, в особенности для оперативного контроля влажности заполнителей для бетона (песка, гравия, щебня). Измерение влажности материала этими методами производят при помощи влагомера, состоящих из измерительного преобразователя и электронного измерительного блока (пульта) с отсчетным устройством. Диэлькометрический метод измерения основан на зависимости между влажностью и диэлектрической проницаемостью материала. Нейтронный метод использует связь влажности и степени замедления быстрых нейтронов, проходящих через материал.

Водопоглощение различных материалов колеблется в широких пределах (% по массе): гранита 0,02—0,7; тя-

желого плотного бетона 2—4; кирпича 8—15; пористых теплоизоляционных материалов 100 и более. Водопоглощение по массе высокопористых материалов может быть больше пористости, но по объему оно никогда не может превышать пористости. Водопоглощение определяют для оценки структуры материала, используя для этой цели коэффициент насыщения пор водой  $K_n$ , равный отношению водопоглощения по объему к пористости:

$$K_n = W_o / P \quad (1.19)$$

Коэффициент насыщения может изменяться от 0 (все поры в материале замкнуты) до 1 (все поры открыты), тогда  $W_o = P$ . Уменьшение  $K_n$  (при той же пористости) свидетельствует о сокращении открытой пористости, что обычно проявляется в повышении морозостойкости.

Водопоглощение отрицательно влияет на основные свойства материала: увеличивается плотность, материал набухает, его теплопроводность возрастает, а прочность и морозостойкость понижаются.

**Коэффициент размягчения**  $k_p$  — отношение прочности материала, насыщенного водой  $R_n$ , к прочности сухого материала  $R_c$ :

$$k_p = R_n / R_c \quad (1.20)$$

Коэффициент размягчения характеризует водостойкость материала, он изменяется от 0 (размокающие глины и др.) до 1 (металлы и др.). Природные и искусственные каменные материалы не применяют в строительных конструкциях, находящихся в воде, если их коэффициент размягчения меньше 0,8.

**Водонепроницаемость** — это свойство материала пропускать воду под давлением, характеризующее коэффициентом фильтрации  $k_f$ , м/ч:

$$k_f = V_a a / [S (p_1 - p_2) t] \quad (1.21)$$

где  $k_f = V_a$  — количество воды, м<sup>3</sup>, проходящее через стенку площадью  $S=1$  м<sup>2</sup>, толщиной  $a=1$  м за время  $t=1$  ч при разности гидростатического давления на границах стенки  $p_1 - p_2 = 1$  м вод. ст.

**Водонепроницаемость материала** (бетона) характеризуется маркой, обозначающей одностороннее гидростатическое давление, при котором образец-цилиндр не пропускает воду в условиях стандартного испытания. Между коэффициентом фильтрации и маркой по водонепроницаемости имеется определенное соотношение: чем ниже  $k_f$ , тем выше марка по водонепроницаемости.

С водопроницаемостью борются при возведении гидротехнических сооружений, резервуаров, коллекторов, стен подвалов и т. п. Стремятся применять достаточно плотные материалы с замкнутыми порами, устраивают гидроизоляционные слои, экраны и др.

**Газо- и паропроницаемость.** При возникновении у поверхностей ограждения разности давления газа происходит его перемещение через поры и трещины материала. Поскольку материал имеет макро- и микропоры, перенос газа может происходить одновременно вязкостным и молекулярным потоками, которые подчиняются соответственно законам Дарси-Пуазейля и Кнудсена.

Использование закона Дарси-Пуазейля при небольших перепадах давлений (когда можно пренебречь изменением плотности газа) позволяет определять массу газа  $V_p$  (плотностью  $\rho$ ), прошедшего через стенку площадью поверхности  $S$  и толщиной  $a$  за время  $t$  при разности давлений газа на гранях стенки  $\Delta p$  по упрощенной формуле:

$$V_p = k_p S t \Delta p / a. \quad (1.22)$$

Отсюда можно определить коэффициент газопроницаемости,  $g/(м \cdot ч \cdot Па)$

$$k_p = a V_p / (S t \Delta p). \quad (1.23)$$

При определении коэффициента газопроницаемости объем проходящего газа приводят к нормальным условиям.

Стеновой материал должен обладать определенной проницаемостью (стена должна «дышать»), т. е. через наружные стены происходит естественная вентиляция, что особенно важно для жилых зданий, в которых отсут-

ТАБЛИЦА 1.3. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРО- И ГАЗОПРоницаемости (ЗА 1 ПРИНЯТА ПРоницаемость КИРПИЧА)

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Пористость, %	Относительные значения	
			паропроницаемости	газопроницаемости
Кирпич глиняный	1800	31	1	1
Легкий бетон	1800	31	0,8	0,9
Кирпич тресканный	1100	58	2,2	4,2
Известняк	2600	23	0,7	1,2
Бетон на гравии	2200	15	0,25	0,1

Создаются условия, способствующие быстрому разрушению материала (легкого бетона, кирпича) наружной ограждающей конструкции при действии мороза.

**Паронепроницаемые материалы** должны располагаться с той стороны ограждения, с которой содержание водяного пара в воздухе больше.

В ряде случаев необходима практически полная газонепроницаемость; это относится к емкостям для хранения газов, а также к специальным сооружениям, внутреннее пространство которых должно быть защищено от проникновения зараженного воздуха. Паро- и газопроницаемость в большей степени зависит от структуры материала (плотности и пористости) (табл. 1.3).

**Влажностные деформации.** Пористые неорганические и органические материалы (бетоны, древесина и др.) при изменении влажности изменяют свой объем и раз-

да, часто встречающееся на практике, сопровождается попеременными деформациями усадки и набухания. Такие многократные циклические воздействия нередко вызывают появление трещин, ускоряющих разрушение. В подобных условиях находится бетон в дорожных покрытиях, в наружных частях гидротехнических сооружений.

Высокопористые материалы (древесина, ячеистые бетоны), способные поглощать много воды, характеризуются большой усадкой, мм/м:

Древесина (поперек волокон) . . . . .	30—100
Ячеистый бетон . . . . .	1—3
Строительный раствор . . . . .	0,5—1
Кирпич глиняный . . . . .	0,03—0,1
Тяжелый бетон . . . . .	0,3—0,7
Гранит . . . . .	0,02—0,06

Усадка возникает и увеличивается, когда из материала удаляется вода, находящаяся в гидратных оболочках частиц и в мелких порах. Испарение воды из крупных пор не ведет к сближению частиц материала и практически не вызывает объемных изменений.

**Морозостойкость** — свойство насыщенного водой материала выдерживать попеременное замораживание и оттаивание. Морозостойкость материала количественно оценивается маркой по морозостойкости. За марку материала по морозостойкости принимают наибольшее число циклов попеременного замораживания и оттаивания, которое выдерживают образцы материала без снижения прочности на сжатие более 15%; после испытания образцы не должны иметь видимых повреждений — трещин, выкрашивания (потеря массы не более 5%). От морозостойкости зависит долговечность строительных материалов в конструкциях, подвергающихся действию атмо-

дород, должен иметь марку 50, 100 и 200, а гидротехнический бетон — до 500.

Рассмотрим причины разрушения пористого материала под влиянием совместного действия на него воды и мороза. Для примера возьмем материал, находящийся в ограждающей конструкции (рис. 1.5). Зимой наружная часть стены промерзает. В это время происходит миграция (перемещение) пара от «тепла к холоду», т. е. пар стремится наружу, поскольку его давление при отрицательной температуре ниже, чем при положительной. Например, давление пара при  $+20^{\circ}\text{C}$  2,33 кПа, а при  $-10^{\circ}\text{C}$  только 0,27 кПа.

Стремясь выйти наружу, водный пар попадает в зону низких температур и конденсируется в порах возле наружной грани стены. Таким образом, поры наружной промерзающей части стены обводняются, причем вода прибывает сюда как снаружи (дождь с ветром), так и изнутри (миграция водяного пара). При наступлении даже небольших морозов (от  $-5$  до  $-8^{\circ}\text{C}$ ) вода в крупных порах замерзает и при переходе в лед увеличивается в объеме на 9% (плотность льда 0,918). Если коэффициент жк

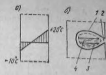


Рис. 1.6. Распределение температуры в наружной стене здания (а) и заполненные поры водой (б), выходящей извне фазовой грани: 1 — водородная вода; 2 — лед; 3 — дождевая вода; 4 — конденсат

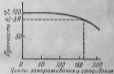


Рис. 1.7. Кривая изменения влажности бетона при его попеременном замораживании и оттаивании

разцы насыщают водой. После этого их замораживают в холодильной камере при температуре от  $-15$  до  $-20^{\circ}\text{C}$ , чтобы вода замерзла в тонких порах. Извлеченные из холодильной камеры образцы оттаивают в воде с температурой  $15-20^{\circ}\text{C}$ , которая обеспечивает водонасыщенное состояние образцов.

Для оценки морозостойкости материала применяют физические методы контроля и прежде всего импульсный ультразвуковой метод. С его помощью можно проследить изменение прочности или модуля упругости бетона в процессе циклического замораживания и оттаивания, число которых соответствует допустимому снижению прочности ( $\Delta R$ ) или модуля упругости ( $\Delta E$ ).

### 3. Теплофизические свойства

Теплопроводностью называют свойство материала передавать теплоту одной поверхности другой. Это свойство является главным как для большой группы теплоизоляционных материалов, так и для материалов, применяемых для устройства наружных стен и покрытий зданий.

Тепловой поток проходит через твердый «каркас» и воздушные ячейки пористого материала. Теплопроводность воздуха [ $\lambda=0.023 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ ] меньше, чем твер-

[ $0.58 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ ] в 25 раз больше теплопроводности воздуха. Замерзание воды в порах с образованием льда еще более увеличивает  $\lambda$ , потому что теплопроводность льда составляет  $0.1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ , а льда —  $2.3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ , т. е. в 4 раза больше, чем воды. При повышении температуры теплопроводность большинства материалов возрастает и лишь у немногих (металлов, магнетитовых огнеупоров) она уменьшается.

Термическое сопротивление  $R$ ,  $\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  слоя многослойной ограждающей конструкции, а также однослойной (однородной) ограждающей конструкции определяют по формуле:

$$R = \delta/k, \quad (1.26)$$

где  $\delta$  — толщина слоя, м;  $k$  — теплопроводность слоя материала,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ .

Термическое сопротивление — важнейшая характеристика качества наружных ограждающих конструкций, связанная с теплопроводностью материалов конструкции; от нее зависит толщина наружных стен здания.

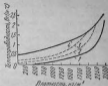


Рис. 1.8. Зависимость теплопроводности органических материалов от влажности: 1 — сырой; 2, 3 — частично сухой с разной влажностью; 4 — испаряющиеся воды от их влажности



ровки промышленных печей. Тугоплавкие материалы размягчаются при температуре выше 1350 °С.

**Огнестойкость** — свойство материала сопротивляться действию огня при пожаре в течение определенного времени. Она зависит от сгораемости материала, т. е. от его способности воспламеняться и гореть.

**Несгораемые материалы** — это бетон, кирпич, сталь и др. Однако необходимо учитывать, что некоторые материалы при пожаре растрескиваются (гранит) или сильно деформируются (металлы) при температуре, начиная с 600 °С, поэтому конструкции из подобных материалов приходится защищать более огнестойкими материалами.

**Трудносгораемые материалы** (асфальтобетон, пропитанная антипиренами древесина, фибролит, некоторые пенопласты) под воздействием огня или высокой температуры тлеют, но после прекращения действия огня их горение и тление прекращаются.

**Сгораемые органические материалы** (они горят открытым пламенем) необходимо защищать от возгорания. Широко используют конструктивные меры, исключаяшие непосредственное воздействие огня на материал в условиях пожара. Применяют защитные вещества — антипирены.

Температурный коэффициент линейного расширения бетона и стали  $10 \cdot 10^{-6}$ , гранита  $(8-10) \cdot 10^{-6}$ , дерева —  $20 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . При сезонной изменении температуры ок-

ласти выполняли А. Н. Комаровский и В. Б. Дубровский.

Уровни радиации вокруг современных источников ионизирующих излучений настолько велики, что может произойти глубокое изменение структуры материала (например, происходит аморфизация структуры кристаллических минералов, которая сопровождается объемными изменениями и возникновением внутренних напряжений).

Для сравнительной оценки защитных свойств различных бетонов можно использовать «толщину слоя половинного ослабления»  $T_{1/2}$ , равную толщине слоя защитного материала, необходимой для ослабления интенсивности излучения в два раза. Толщина слоя половинного ослабления  $T_{1/2} = 0,693 \lambda$ ,

где  $\lambda$  — длина релаксации, см, численно равная толщине слоя данного материала, ослабляющего поток излучения в  $e$  раз ( $e$  —  $e \approx 2,718$  раза); здесь  $e$  — основание натурального логарифма.

## § 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

### 1. Деформативные свойства

Основными деформативными свойствами строительного материала являются: упругость, пластичность, хрупкость, модуль упругости (модуль Юнга), коэффициент Пуассона, модуль сдвига, объемный модуль

Пластическую, или остаточную деформацию, не исчезающую после снятия нагрузки, называют необратимой.

**Хрупкость** — свойство твердых тел разрушаться при механических воздействиях без значительной пластической деформации (свойство, противоположное пластичности).

Рассмотрим связь строения и деформативных свойства материала. Внешние силы, приложенные к телу, вызывают изменения межатомных расстояний, отчего происходит изменение размеров деформируемого тела на величину  $\Delta l$  в направлении действия силы (при сжатии укорочение, при растяжении удлинение). Относительная деформация  $\epsilon$  равна отношению абсолютной деформации  $\Delta l$  к первоначальному линейному размеру  $l$  тела:

$$\epsilon = \Delta l / l. \quad (1.25)$$

Деформация происходит вследствие удаления или сближения атомов, причем смещения атомов пропорциональны деформации тела.

На частицы, из которых состоит твердое тело, одновременно действуют силы притяжения и силы отталкивания: кулоновская сила притяжения разноименных ионов и сила отталкивания электронных оболочек (рис. 1.9, а). Результирующая сила  $F$ , равная сумме сил притяжения и отталкивания, изменяется в зависимости от межатомного расстояния. Ее изменение можно наглядно представить, используя пружинную модель межатомных сил (рис. 1.9, б). Когда твердое тело не нагружено, межатомное расстояние остается постоянным (хотя атомы совершают непрерывные колебания) и результирующая сила равна нулю. При превышении равновесного межатомного расстояния (при растяжении пружины) атомы находятся под действием сближающей силы. Наоборот, если расстояние между атомами уменьшается (при сжатии стержня), то возникает отталкивающая сила сжатой пружины (см. рис. 1.9, б). Наклон производной  $\frac{dF}{da}$  в точке

О связан с величиной модуля упругости и по существу закон Гука является приближенным соотношением, отражающим характер межатомных взаимодействий в диапазоне упругих деформаций.

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

$$\sigma = \epsilon E. \quad (1.27)$$

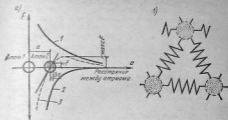


Рис. 1.9. Схема сил взаимодействия между атомами:  $a$  — межатомные силы в зависимости от расстояния между атомами; 1 — сила притяжения; 2 — сила отталкивания; 3 — результирующая сила; б — пружинная модель

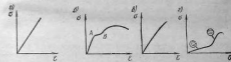


Рис. 1.10. Схемы диаграмм деформаций  $\epsilon$  от напряжения  $\sigma$ : а — стекло; б — сталь; в — бетон; г — пластмасса; А-В — плоская текучесть

При одноосном растяжении (сжатии) напряжение определяется по формуле  $\sigma = P/F$ , где  $P$  — действующая сила;  $F$  — площадь первоначального поперечного сечения элемента.

ТАБЛИЦА 14. ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ  $E$  ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ  $t_{пл}$  МАТЕРИАЛА

Материал	$E \cdot 10^{-4}$ МПа	$t_{пл}^{\circ}$ °C	Материал	$E \cdot 10^{-4}$ МПа	$t_{пл}^{\circ}$ °C
Карбид кремния	35,5	2800	Алюминий	7	600
Периклаз	24,6	2800	Синце	1,5	327
Корунд	37,2	2050	Полистирол	0,3	300
Железо	21,1	1539	Каучук	0,007	300
Медь	11,2	1083			

Модуль упругости представляет собой меру жесткости материала. Материалы с высокой энергией межмолекулярных связей (они плавятся при высокой температуре) характеризуются и большими модулем упругости (табл. 1.4).

Механические свойства материала характеризуются диаграммой деформации, построенной на основании результатов испытаний в координатах «напряжение — относительная деформация» ( $\sigma - \epsilon$ ). Модуль упругости определяется тангенсом угла наклона производной  $\frac{d\sigma}{d\epsilon}$  к оси деформаций. На рис. 1.10 представлены кривые  $\sigma - \epsilon$  для строительных материалов: упругих, пластичных, хрупких и эластомеров. Стекло деформируется как упругий хрупкий материал (рис. 1.10, а).

Поликристаллические изотропные материалы (металлы, кристаллические полимеры и др.) сохраняют упругость при значительных напряжениях; для многих из них характерно пластическое разрушение, отмеченное площадкой текучести  $A-B$  на диаграмме  $\sigma - \epsilon$  (рис. 1.10, б). При хрупком же разрушении пластические деформации невелики (рис. 1.10, в).

Нелинейное соотношение между напряжением и деформацией у некоторых материалов проявляется при относительно невысоких напряжениях. Так, у материалов с коагломератным строением (различного вида бетонов) оно отчетливо наблюдается уже при напряжениях, превышающих 0,2 предела прочности.

Упругая деформация эластомеров (каучуков) может превышать 100%. Первоначально для распрямления цепей молекул эластомера требуется низкое напряжение. По мере распрямления цепей молекул сопротивление дальнейшему деформированию возрастает, так как увеличение деформаций вызывает разрыв связей уже выпрямленных молекул (рис. 1.10, г). Таким образом, диаграммы деформаций позволяют определить модуль упругости и установить его изменение в зависимости от уровня напряженного состояния.

Модуль упругости материала  $E$  связан с другими упругими его характеристиками посредством коэффициента Пуассона. Одноосное растяжение  $\sigma$ , вызовет удлинение по этой оси  $+\epsilon_x$  и сжатие по боковым осям  $-\epsilon_y$  и  $-\epsilon_z$ , которые у изотропных материалов равны между собой.

Коэффициент Пуассона, или коэффициент поперечного сжатия,  $\mu$  равен отношению

$$\mu = -\epsilon_y/\epsilon_x \quad (1.28)$$

Если бы объем материала при одноосном упругом нагружении оставался постоянным, то наибольшее теоретическое значение  $\mu = 0,5$ . Силы притяжения и отталкивания в материале различным образом зависят от изменения межмолекулярного расстояния, поэтому значения коэффициента Пуассона реальных материалов сильно отличаются от теоретических значений этого коэффициента, например бетона 0,17—0,2; полиэтилена 0,4.

Объемный модуль упругости, или модуль всестороннего сжатия (растяжения),  $K$  связан с модулем Юнга следующим соотношением:

$$K = E/[3(1 - 2\mu)] \quad (1.29)$$

Модуль сдвига связан с модулем Юнга посредством коэффициента Пуассона

$$G = E/[2(1 + \mu)] \quad (1.30)$$

Поскольку  $\mu = 0,2 - 0,3$ ,  $G$  составляет 35—42%  $E$ . Используя приведенную выше формулу для  $K$ , получим

$$G = 3K(1 - 2\mu)/[2(1 + \mu)] \quad (1.34)$$

Экспериментально определив модуль Юнга и коэффициент Пуассона, можно вычислить модуль сдвига и объемный модуль упругости, пользуясь приведенными формулами (вывод этих формул дается в курсе сопротивления материалов).

## 2. Прочность

**Прочность** — свойство материала сопротивляться разрушению под действием внутренних напряжений, вызванных внешними силами или другими факторами (стесненной усадкой, неравномерным нагреванием и т. д.).

Прочность материала оценивают пределом прочности (временным сопротивлением)  $R$ , определенным при данном виде деформации. Для хрупких материалов (природных каменных материалов, бетонов, строительных растворов, кирпича и др.) основной прочностной характеристикой является предел прочности при сжатии. Поскольку строительные материалы неоднородны, предел прочности определяют как средний результат испы-

тания серии образцов (обычно не менее трех). Форма и размеры образцов, состояние их опорных поверхностей существенно влияют на результаты испытаний.

Например, у кубиков малых размеров предел прочности при сжатии оказывается выше, чем у кубиков больших размеров из того же материала. Призмы показывают меньшее сопротивление сжатию, чем кубы одинакового поперечного сечения. Это объясняется тем, что при сжатии образца возникает его поперечное расширение. Силы трения, возникающие между опорными гранями образца и плитами пресса, удерживают частицы образца, прилегающие к плитам, от поперечного расширения и, следовательно, от разрушения. Средние же части образца, испытывая поперечное расширение, расширяются в первую очередь. Поэтому при испытании кубов из хрупких материалов (бетона, раствора, камня

В зависимости от прочности строительные материалы разделяются на марки. Марка материала по прочности является важнейшим показателем его качества. В нормативных документах марка указывается в кгс/см<sup>2</sup>; например, марка портландцемента может быть: 400, 500, 550 и 600. Чем выше марка, тем выше качество конструкционного строительного материала. Единая шкала марок охватывает все строительные материалы.

Предел прочности при осевом сжатии  $R_{сж}$ , МПа, равен частному от деления разрушающей силы  $P_{разр}$  на первоначальную площадь поперечного сечения образца (куба, цилиндра, призмы):

$$R_{сж} = P_{разр}/F. \quad (1.32)$$

В табл. 1.5 систематизированы характерные образцы, применяемые для определения предела прочности строительных материалов при сжатии.

Предел прочности при осевом растяжении  $R_0$  (МПа) используется в качестве прочностной характеристики стали, бетона, волокнистых и других материалов (табл. 1.6). В зависимости от соотношения  $R_0$  и  $R_{сж}$  материалы можно условно разделить на три группы: к первой относятся материалы, у которых  $R_0 > R_{сж}$  (волокнистые — древесина и др.); ко второй — с  $R_0 \approx R_{сж}$  (сталь); к третьей — с  $R_0 < R_{сж}$  (хрупкие материалы).



Рис. 1.11. Схемы разрушения кубов из материала

а — при сжатии куба;  
б — то же, со смазанными опорными гранями

ТАБЛИЦА 15. СХЕМА СТАНДАРТНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛОВ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ

Образец	Эскиз	Расчетная формула	Материал	Размер стандартного образца, см
Куб		$R = \frac{P}{a^2}$	Бетон	15×15×15 7,07×7,07× ×7,07
			Природный камень	5×5×5; 15×15× ×15 и др.
Цилиндр		$R = \frac{4P}{\pi d^2}$	Бетон	d = 15; h = 30
			Природный камень	d = h = 5; 7; 10; 15
Прямоугольник		$R_{ср} = \frac{P}{a^2}$	Бетон	a = 10; 15; 20; h = 40; 60; 80
			Дерево	a = 2; h = 3
Составной		$R = \frac{P}{S}$	Кирпич	a = 12; b = 12; h = 14
Половина кирпича		$R = \frac{P}{S}$	Цемент	a = 4; S = 25 см²
Проба щебня (гравия) в цилиндре		$\frac{m_1 - m_2}{m_3} \times 100$	Крупный заполнитель бетона	d = 15; h = 30

ТАБЛИЦА 16. СХЕМА СТАНДАРТНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ПРИ ИЗГИБЕ И РАСТЯЖЕНИИ

Образец	Схема испытаний	Расчетная формула испытания	Материал	Размер стандартного образца, см
Прямоугольник (в натуре)		При изгибе $R_{из} = \frac{3Pl}{2bh^2}$	Цемент	4×4×16
			Кирпич	12×6,5× ×25
Прямоугольник		$R_{р,из} = \frac{Pl}{bh^2}$	Бетон	15×15× ×60
			Дерево	2×2×30
Стержень, восьмьгранник, призма		При растяжении $R_p = \frac{4P}{\pi d^2}$ $R_p = \frac{P}{a^2}$	Бетон	5×5×50; 10×10× ×80
			С аль	d <sub>0</sub> = 1; l <sub>0</sub> = 5; l ≥ 10d
Цилиндр		$R_{p,р} = \frac{2P}{\pi dl}$	Бетон	d = 15

ударных нагрузках. Она характеризуется количеством работы, затраченной на разрушение стандартного образца, отнесенной к единице объема (Дж/см³) или площади поперечного сечения образца (Дж/м²). Сопротивление удару важно для материалов, используемых при устройстве фундаментов машин, полов промышленных зданий, дорожных покрытий и т. п.

Коэффициент конструктивного качества (к. к. к.) материала равен отношению показателя прочности  $R$

(МПа) к относительной плотности  $d$  (безразмерная величина):

$$k, \text{ к. к.} = R/d, \quad (1.34)$$

следовательно, эта прочность отнесена к единице плотности. Лучшие конструкционные материалы имеют высокую прочность при малой собственной плотности. Повышения к. к. к. можно добиться снижением плотности материала и увеличением его прочности.

Теоретическая прочность однородного материала характеризуется напряжением, необходимым для разделения двух примыкающих один к другому слоев атомов. Теоретическую прочность  $\sigma_{теор}$  получают из условия, что в момент разрушения вся энергия упругой деформации, накопленная в объеме между двумя слоями атомов, переходит в поверхностную энергию двух вновь образовавшихся при разрушении поверхностей. Согласно уравнению Орована—Келли,

$$\sigma_{теор} = \sqrt{E\mathcal{E}/a}, \quad (1.35)$$

где  $E$  — модуль упругости;  $\mathcal{E}$  — поверхностная энергия твердого тела на 1 см<sup>2</sup>;  $a$  — межатомное расстояние (в среднем  $2 \cdot 10^{-8}$  см).

Следовательно, теоретическая прочность материала тем выше, чем больше его модуль упругости и поверхностная энергия и чем меньше межатомное расстояние.

Согласно приведенному выражению, прочность твердого тела должна находиться между значениями  $E/5$  и  $E/10$ . Теоретическая прочность стекла при комнатной температуре 14 000 МПа, прочность на растяжение тонких стеклянных волокон толщиной 3—5 мкм — 3500—5000 МПа, а обыкновенного стекла только 70—150 МПа. Следовательно, используется сравнительно небольшая доля потенциальной прочности материала: прочность понижается благодаря наличию пор, трещин и дефектов структуры материала.

Широко используют методы, которые позволяют испытывать без разрушения образцы или отдельные изделия, определяя вместе с тем степень их однородности. Этими методами можно также испытывать изделия при их изготовлении на заводах, и материалы, находящиеся в конструкциях здания и сооружения.

К физическим методам испытания относят: импульсный ультразвуковой, резонансный и радиометрический. При импульсном ультразвуковом методе оценка свойств производится по замеренной скорости прохождения про-

должных ультразвуковых волн с использованием корреляционной связи между скоростью распространения упругих волн в материале и его механическими свойствами. Скорость распространения продольных упругих волн  $v$  связана с модулем упругости  $E$  и плотностью  $\rho$  приближенной зависимостью:

$$v = K\sqrt{E/\rho}; \quad (1.36)$$

при коэффициенте Пуассона  $\mu = 0,16$ — $0,25$   $K = 1,05$ .

Для определения прочности материала необходимо построить тарировочный график. По полученным экспериментальным данным строят график зависимости  $R$  от  $v$ , которым можно пользоваться при выявлении конструкции из данного материала (рис. 1.12). Без определения прочности можно также установить степень однородности материала в конструкции по скорости распространения ультразвука в различных ее частях.

Однородность прочности материала — это важнейшее техническое и экономическое требование. Для оценки однородности материала используют результаты контрольных испытаний образцов за определенный период времени. Прочность образцов будет колебаться, отклоняться от среднего значения в большую и меньшую стороны. На прочности материала сказываются колебания в качестве сырья, точность дозирования составляющих и другие технологические факторы. Чем ближе частные результаты испытания образцов к среднему значению, тем выше однородность материала.

Коэффициент вариации прочности  $V$ , %, вычисляют по формуле:

$$V = s/\bar{R} \cdot 100, \quad (1.37)$$

где  $s$  — среднее квадратичное отклонение частных результатов испытания от средней прочности  $\bar{R}$ , определяемое по формуле

$$s = \sqrt{\frac{\sum(R - \bar{R})^2}{n - 1}}$$

Средняя же прочность равна:

$$\bar{R} = \Sigma R/n,$$

где  $R$  — предел прочности отдельного образца;  $n$  — число испытанных образцов.

В идеальном случае «для абсолютно однородного» материала  $s = 0$  и  $V = 0$ . Неудовлетворительная однород-

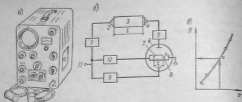


Fig. 1.12. Ultrasonic method of control of quality of materials

1 — внешний вид прибора; 2 — схема прибора; 3 — генератор импульсов; 4 — преобразователь ультразвуковых колебаний; 5 — образцы материала; 6 — преобразователь механических колебаний в электрические; 7 — усилитель; 8 — экран вольтметра; 9 — изображение показаний вольтметра; 10 — измерительное устройство, генератор тока, включаемый в электрическую цепь; 11 — выключатель, в котором моделируется процесс распространения ультразвука; 12 — выключатель в электрическую цепь; 13 — время распространения ультразвука, мкс; 14 — время распространения звука в материале; 15 — скорость распространения ультразвука в материале; 16 — скорость распространения звука в материале.

ность характеризуется значениями  $V \geq 16\%$ ; на предприятиях с хорошо налаженной технологией значение  $V$  не превышает 3—7%. От коэффициента вариации зависит надежность материала в конструкции, расхода цемента в бетоне и экономические показатели. Поэтому коэффициент вариации является важнейшим показателем качества материала. Например, высокопрочные цементы, поставляемые со Знаком качества, характеризуются  $V \leq 3\%$ .

При статистическом методе контроля требования к прочности материала назначают с учетом фактической однородности прочности, характеризуемой коэффициентом вариации прочности материала.

При вероятностно-статистическом методе контроля качества материалы подразделяют по прочности на классы. Класс прочности характеризует показатель прочности материала с определенной статистической обеспеченностью, принятой при проектировании (см. гл. 6).

### 3. Влияние строения материала на его прочность

Прочность материала одного и того же состава зависит от его пористости. На рис. 1.13 представлен график прочности цементного бетона, показывающий, что увели-

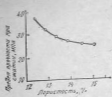


Fig. 1.13. Curves dependence of strength of concrete on porosity

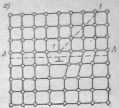


Fig. 1.14. Curves dislocation in a crystal lattice (1) (A-A — dislocation) and slip plane (A-A) (2) — dislocation

чение пористости с 12,4 до 15,2% снизило прочность при сжатии с 37,5 до 26 МПа. Подобная зависимость характерна и для других материалов (известняки, керамических материалов и пр.).

Кристаллические материалы имеют большее или меньшее количество точечных дефектов. Одни из них заключаются в том, что некоторые атомы или ионы смещены в другие положения и могут располагаться даже между узлами кристаллической решетки (дефекты Френкеля). Их нормальные места остаются свободными и затем замещаются другими ионами. Следовательно, в узлах решетки могут быть свободные места (вакансии). Другого рода дефекты возникнут в результате размещения атомов или ионов (примеси замещения) в узлах решетки, где они заменяют основное вещество (примеси замещения), или между ними (примеси внедрения).

Свойства кристаллических материалов зависят от дислокаций кристаллов. Дислокация — это всегда одномерный (линейный) дефект кристаллической решетки, возникающий в процессе образования кристалла или в



Рис. 1.15. Складка атомов в процессе движения дислокации. AA' — первоначальное положение дислокации, BB' — конечное положение дислокации

результате последующих механических, тепловых и других воздействий. Дислокации бывают краевые, винтовые и смешанные — криволинейные.

На рис. 1.14, а схематически изображена крайняя дислокация. Отклонение от идеального строения кристалла вызвано тем, что один слой атомов (он расположен на рис. 1.14 в экстраллокости) по какому-то причинам оказался незавершенным. Кромка I—I «лишнего» слоя атомов образует линейный дефект, называемый кривой дислокацией (обозначена на рис. 1.14, а знаком  $\perp$ ). По обе стороны от кромки экстраллокости атомы сдвинуты на угол, соответствующий теоретической прочности кристалла на сдвиг. Стоит приложить внешнее усилие, значительно меньшее теоретической прочности данного кристалла, и в плоскости A—A, нормальной к экстраллокости, произойдет сдвиг на одно межатомное расстояние (рис. 1.14, б).

Продолжая нагружать кристалл, перемещаем дислокацию из одного ряда атомов в другой, пока не вытолкнем дислокацию на грань кристалла. Механизм скольжения, основанный на движении дислокаций, может быть сопоставлен с перемещением на полу ковра с предварительно созданной складкой (рис. 1.15). При таком способе требуется значительно меньшее усилие, чем в случае перемещения ковra как единого целого.

Дислокационная теория рассматривает пластический сдвиг в кристаллических материалах как скольжение путем движения дислокаций. Подвижность дислокаций зависит от того, насколько легко межатомная связь может быть разрушена и вновь восстановлена; ведь каждый раз, когда дислокация перемещается на один шаг (межатомное расстояние), должны рваться старые связи и устанавливаться новые. В этом отношении предпочтительнее связи, обеспечивающие одинаковое притяжение во всех направлениях: металлическая и ионная. Дислокации в ковалентных кристаллах при нормальной температуре малоподвижны, так как ковалентная связь является направленной, наиболее прочной и жесткой.

Дислокации присутствуют почти во всех кристаллических материалах. Они значительно понижают прочность

монокристаллов, но зато придают пластичность поликристаллическим телам с металлической связью, делают металл ковким, затрудняют распространение трещин.

Доказательством, подтверждающим объяснение низкой прочности кристаллов движением дислокаций, являются результаты изучения механических свойств нитевидных кристаллов различных материалов, выращенных без краевых дислокаций, способных претерпеть упругую деформацию до 5—6% без признаков пластического течения. Бездислокационные кристаллы способны выдерживать напряжения сдвига, достигающие 5% модуля сдвига; это на несколько порядков больше, чем у обычных кристаллов. В реальности дислокаций убеждают и непосредственные наблюдения.

Плотность дислокаций (т. е. число дислокаций, пересекающих площадь  $1 \text{ см}^2$ ) может быть весьма велика — до  $10^7$ — $10^8$  (в отожженных металлах). При механических воздействиях дислокации перемещаются, взаимодействуют между собой и порождают новые дислокации, в особенности в местах концентрации напряжений. В результате их плотность возрастает до  $10^{10}$ — $10^{12}$  (в сильно наклепанных металлах). Когда дислокаций много (больше некоторой критической плотности), они перемещаются (словно спутанные нитки), тормозят перемещение один другим, в результате материал упрочняется. Однако при дальнейшем деформировании материал может сделаться хрупким.

Вакансии в кристаллической решетке, межузельные (внедренные) атомы, дислокации играют важную роль в процессах диффузии, повышают химическую активность, что используется, в частности, в технологии быстротвердеющих цементах. Однако наличие дислокаций и дефектов структуры в готовом материале снижает его стойкость, так как деформированные межатомные связи (как и места концентрации напряжений) более уязвимы для химических и физических воздействий среды. Следовательно, дислокации следует рассматривать как структурный фактор, регулирующий комплекс наиболее важных свойств кристаллических материалов.

#### 4. Механическое разрушение

Различают хрупкое и пластическое разрушение твердых тел. Хрупкое разрушение сопровождается очень



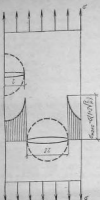


Рис. 1.15. Концентрация напряжений в области с трещиной



Рис. 1.17. Стадия тупения трещины (по Куку—Гордону)

хрупкими; у них происходит переход от пластического разрушения к хрупкому. Так ведут себя битумные материалы, некоторые полимеры, металлы и др.

Хрупкое разрушение происходит в результате образования и быстрого роста одной или нескольких трещин при возрастающей нагрузке. Трещина (как и надрез) вызывает концентрацию напряжений около ее вершины (рис. 1.16). В этом месте напряжение оказывается значительно большим, чем можно ожидать при простом уменьшении

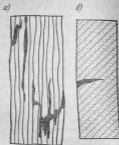


Рис. 1.18. Взаимные внутренние напряжения в термоэластичном материале вблизи трещины  
а — однородный материал, содержащий внутреннюю поверхность  
б — слоистый материал (по Гордону)

малой предшествующей пластической деформацией. Хрупкость присуща не только кристаллическим, стеклообразным, но и полимерным материалам. Разрушению пластичных (вязких) материалов предшествует изменение формы и большая деформация. Большинство материалов при понижении температуры становятся

площади поперечного сечения. Напряжение  $\sigma_n$  на конце трещины зависит от номинального напряжения  $\sigma_0$ , длины (глубины) трещины  $l$  и радиуса кривизны в вершине трещины  $r$ :

$$\sigma_n = \sigma_0 (1 + 2\sqrt{l/r}). \quad (1.38)$$

Коэффициент концентрации напряжений  $\sigma_n/\sigma_0 = 1 + 2\sqrt{l/r}$  может быть равен 100 и даже 1000, если радиус вершины трещины соизмерим с радиусом атома, хотя глубина трещины лишь 0,1—10 мкм. Следовательно, местное напряжение может превзойти 7000 МПа при номинальном (т. е. среднем по сечению) напряжении 35—100 МПа. Трещина как бы разрезает атомные цепочки, и значительная часть нагрузки, которую несли разрезанные атомные цепочки, приходится теперь на атомную связь у конца трещины. Перегруженная часть ломает равные другим, и положение ухудшится, так как следующее звено будет еще больше перегружено. Таким образом, трещина становится (по словам Гордона) тем инструментом, с помощью которого приложенная извне слабая сила рвет прочные межатомные связи.

При распространении трещины материал вблизи нее разгружается, и вследствие этого выделяется энергия упругой деформации.

Объем, в котором выделяется энергия, изображается на рис. 1.16 как половина объема цилиндра единичной высоты, числовое равного  $\pi l^2/2$ . Выделенная энергия  $U_d$  зависит от приложенного напряжения  $\sigma$ , модуля упругости  $E$  и глубины трещины  $l$  (половины длины внутренней трещины):

$$U_d = -\frac{\pi l^2}{2E} \sigma^2.$$

Образование двух новых поверхностей трещины требует затрат энергии:  $U_s = 2\mathcal{E}_1 l$ , где  $\mathcal{E}_1$  — поверхностная энергия единицы площади поверхности.

Трещина будет самопроизвольно расти, если длина трещины превышает некоторую «критическую длину Гриффитса», при которой освобождающаяся энергия упругой деформации равна энергии образующихся новых поверхностей. Тогда

$$\pi l^2/E = 2\mathcal{E}_1,$$

откуда

$$\sigma = (2\beta, E/\pi l)^{1/2},$$

(1.30)

там, устраняется концентрация напряжений в вершине трещины и тенденция ее распространения (рис. 1.18).

Напряжение, необходимое для разру-



нос определяют на образцах материалов, которые испытывают во вращающемся барабане со стальными шарами с диаметром 10 мм. Показателем износа является потеря

