

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

К.Е. Сазонов

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ.
МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ.
ЛЕД И СНЕГ

Учебное пособие



Санкт-Петербург
2007

УДК 620.22

Сазонов К.Е. Материаловедение. Свойства материалов. Методы испытаний. Лед и снег. – СПб., изд. РГГМУ, 2007. – 195 с.

Рассматриваются свойства основных конструкционных и электротехнических материалов, используемых в морских технологиях, а также методы их испытаний. Большое внимание уделено описанию процессов электрохимической коррозии. Отдельная часть книги посвящена изучению природных материалов – льда и снега. В этой части подробно описываются механические и теплофизические свойства этих материалов. Рассмотрены технологии получения гранулированного и моделированного льда. Приведены примеры использования льда и снега в хозяйственной деятельности. Описаны технологии борьбы с вредными проявлениями льда и снега.

Книга может быть использована в качестве справочного пособия по определению механических и теплофизических свойств льда и снега.

Учебное пособие предназначено для студентов и аспирантов, специализирующихся на изучении различных морских технологий.

Рецензенты: В.К. Гончаров, д-р. техн. наук, проф. (СПбГМТУ);
Н.Ю. Клементьева, канд. техн. наук (ЦНИИ им. акад.
А.Н. Крылова)

92-к 1338

Российский государственный
гидрометеорологический университет

БИБЛИОТЕКА

195196, СПб, Малоохтинский пр., 98

- © К.Е. Сазонов, 2007
- © Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2007

ВВЕДЕНИЕ

Материаловедение – наука, изучающая строение и свойства материалов и устанавливающая связь между их составом, строением и свойствами. Знание свойств материалов всегда играло большую роль в истории человечества. Об этом свидетельствуют названия исторических эпох: каменный век, бронзовый век, железный век. Материаловедение и в настоящее время имеет важное значение в развитии технического прогресса. Без глубоких фундаментальных исследований в области материаловедения невозможно создание современных технических устройств, эксплуатирующихся в экстремальных условиях.

Важнейшими приложениями современного материаловедения являются морские технологии. Создание нефтедобывающих платформ, способных противостоять штормам, и подводных аппаратов, работающих на глубинах в несколько километров, потребовало разработки уникальных материалов, применение которых обеспечивает безопасность конструкций. Приведенные примеры, являясь наиболее яркими, не исчерпывают всего спектра применения материаловедческих разработок в морских технологиях. Практически в любом изделии, предназначенном для эксплуатации в морских условиях, используются накопленные в материаловедении знания.

В курсе материаловедения будут рассмотрены как искусственные материалы, так и природные, которые находят применение в морских технологиях. Изучить свойства всех материалов, применяемых в морской практике в одном кратком курсе невозможно. Поэтому мы ограничимся рассмотрением наиболее распространенных материалов. К ним в первую очередь относятся, стали, чугуны, латуни, бронзы, алюминиевые сплавы и др. Отдельно будут рассмотрены электроматериалы, применяемые в приборостроении. Особое внимание обратим на природные материалы – лед и снег, их свойства и технологии использования.

В практике применяют различные свойства материалов: прочностные (деформационные), теплофизические, электрические, магнитные и др.

Наибольшее распространение получили конструкционные материалы, для которых очень важны прочностные свойства. Поэтому в начале курса мы рассмотрим характеристики прочностных свойств материалов: упругость, пластичность, ползучесть, трещиностойкость и т.д. После этого изучим различные технологии определения физических свойств материалов. Затем довольно подробно остановимся на основных видах искусственных материалов, применяемых в морских конструкциях. Здесь наряду с традиционными материалами и технологиями будут рассмотрены и современные перспективные наноматериалы. В завершении будет показано взаимодействие искусственных материалов с агрессивной морской средой (процессы коррозии).

Отдельной важной частью курса является изучение естественных материалов льда и снега. В регионах с холодным климатом эти материалы имеют важное хозяйственное значение. Мы подробно остановимся на их прочностных и теплофизических свойствах, которые наиболее часто используются в практических целях, также на некоторых технологиях применения этих материалов. Другие технологии, такие как возведение искусственных ледяных островов, переправ и т.п., будут обсуждаться в следующем курсе «Морские технологии», который читается студентам и магистрам V и VI курсов, обучаемых по специализации «Техническая океанология».

Часть I

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛЫ

1. Механические свойства материалов

1.1. Основные понятия механики сплошной среды

К конструкционным материалам относят те материалы, из которых изготавливают различные конструкции, детали машин и приборов. Основным требованием, предъявляемым к этим материалам, является возможность их использования в конкретных условиях эксплуатации. Эти условия могут быть разнообразными – различные условия нагружения, температура, агрессивная внешняя среда и т.п. Удовлетворение этим требованиям достигается путем применения материалов со специальными свойствами.

Одним из основных требований, которому должны удовлетворять практически все конструкционные материалы, является конструктивная прочность. В это понятие входят требования к прочности, надежности и долговечности материала конструкции. Все эти характеристики относятся к механическим свойствам материалов.

Прежде чем рассматривать прочностные свойства материалов, необходимо ввести несколько основных понятий и допущений. Основное допущение, принимаемое при рассмотрении вопросов прочности с позиций механики, заключается в принятии гипотезы *сплошной среды*. В соответствии с этой гипотезой материал твердого тела однороден и равномерно распределен по всему объему тела, так что самый малый элемент, вырезанный из тела, обладает теми же физическими свойствами, что и все тело. Физические методы исследования показывают, что для большинства конструкционных материалов эта гипотеза не выполняется. Например, сталь при рассмотрении ее под микроскопом оказывается состоящей из огромного множества кристаллов разной величины и разной ориентации. Тем не менее, при решении многих инженерных задач гипотеза сплошной среды оказывается очень продуктивной. Объ-

яснение этого парадокса заключается в том, что кристаллы, из которых состоят материалы, очень малы. В 1 см^3 заключаются миллионы кристаллов стали. Поэтому, изучая механические свойства материалов, мы имеем дело с усредненными огромному количеству кристаллов величинами, которые характеризуют материал как сплошную среду, а не свойство отдельного кристалла.

Все вышесказанное относилось к *изотропным* материалам, т.е. к таким материалам, свойства которых одинаковы в любых направлениях. Существуют природные и искусственные *анизотропные* материалы, свойства которых зависят от выбранного направления. К таким материалам применима гипотеза сплошной среды. Существуют еще композитные материалы, состоящие из матрицы и заполнителя, механические свойства которых существенно отличаются. При описании таких материалов применяется гипотеза сплошной среды для матрицы и наполнителя в отдельности. Иногда при рассмотрении механических свойств композитных материалов используют специальные приемы усреднения, позволяющие получить некоторые эффективные свойства материала в целом.

Основными механическими понятиями сплошной среды являются понятия *напряжения и деформации*. Рассмотрим некоторое твердое тело, находящееся в положении равновесия под действием n внешних сил (рис. 1.1). При этом между различными частями тела возникают внутренние силы взаимодействия. Чтобы определить эти силы в некоторой произвольной внутренней точке O мысленно разрежем тело плоскостью mn , содержащей точку O , на две части A и B . Рассмотрим одну из частей тела, например часть A . Она находится в равновесии под действием k внешних сил, а так же внутренних сил, непрерывно распределенных по сечению mn . Внутренние силы представляют воздействие отброшенной части B на материал части A . Величины этих сил определяются их *интенсивностью*, т.е. величиной силы, отнесенной к единице площади, на которую она действует. Эта интенсивность называется *напряжением*. Из определения следует, что напряжение является векторной величиной.

Обычно напряжение распределено по сечению тела неравномерно, поэтому интересуются величиной напряжения по некото-

рой малой площадке δA , вырезанной из сечения mn в точке O . В соответствии с законами механики воздействие части тела B на часть A , передаваемое через рассматриваемую площадку можно свести к результирующей силе δP . При стремлении $\delta A \rightarrow 0$ отношение $\delta P / \delta A$ даст величину напряжения, действующего в поперечном сечении mn в точке O . В общем случае вектор напряжения наклонен к площадке. Его можно разложить на *нормальное напряжение*, перпендикулярное площадке, и на *касательное напряжение*, действующее в плоскости площадки δA .

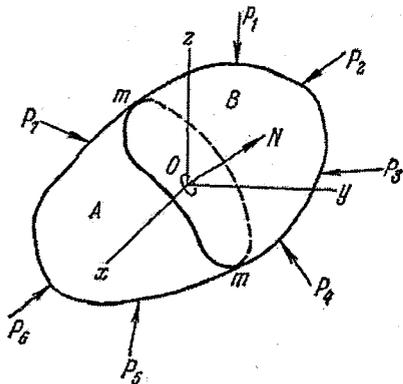


Рис. 1.1. Произвольное тело, находящееся в равновесии под действием системы сил.

Нормальные напряжения обозначаются греческой буквой σ , а касательные — буквой τ . К этим буквам добавляются индексы, показывающие ориентацию напряжений в пространстве. Рассмотрим малый кубический элемент с центром в точке P , грани которого параллельны координатным осям. По граням

кубического элемента действуют напряжения. У нормальных напряжений имеется один индекс, показывающий, что направление действия напряжения совпадает с соответствующим перпендикуляром к площадке. Нормальное напряжение считается положительным, если оно вызывает растяжение материала.

Касательные состоят из двух компонент, параллельных координатным осям. Они имеют два индекса, первый из них показывает направление нормали к площадке, а второй направление компоненты напряжения. Положительные направления компонент касательных напряжений на грани кубического элемента принимаются совпадающими с положительным направлением координатных осей, если растягивающее напряжение для этой грани совпадает с положительным направлением соответствующей оси.

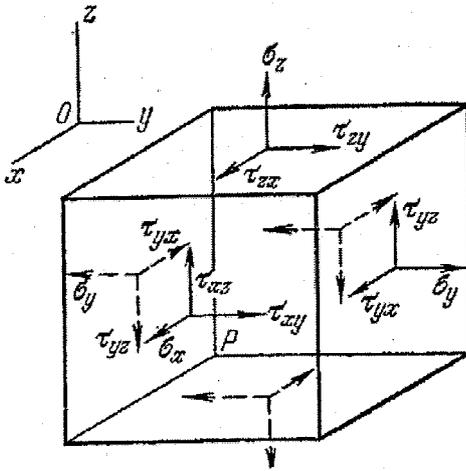


Рис. 1.2. Напряжения в координатных плоскостях.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

Можно показать, что для касательных напряжений выполняется «закон парности касательных напряжений». Напряжения, симметричные относительно главной диагонали равны или, другими словами, касательные напряжений, действующие на двух взаимно перпендикулярных гранях кубического элемента, равны. Поэтому для описания напряженного состояния достаточно знать 6 компонент тензора напряжений.

Среди бесконечного множества элементарных площадок, содержащих рассматриваемую точку твердого тела, всегда можно выбрать такие площадки, на которые действуют либо только нормальные, либо касательные напряжения. Напряжения, действующие по этим площадкам, называются *главными* и обозначаются индексами 1, 2 и 3.

Под действием приложенных внешних сил и при изменении теплового состояния тела изменяются расстояния между его час-

Если растягивающие напряжения имеют направление, противоположное положительному направлению оси, то положительные направления компонент касательного напряжения меняются на обратные (рис. 1.2).

В общем случае напряженное состояние тела в некоторой точке характеризуется 9 компонентами тензора напряжений:

тицами. Это явление составляет деформацию твердого тела. Будем считать, что под действием внешних сил и температурных полей перемещения частиц деформированного тела можно разложить на компоненты u , v , w , параллельные координатным осям. Эти компоненты являются малыми и изменяются непрерывно по объему тела. Рассмотрим малый прямоугольный элемент деформированного тела (рис. 1.3).

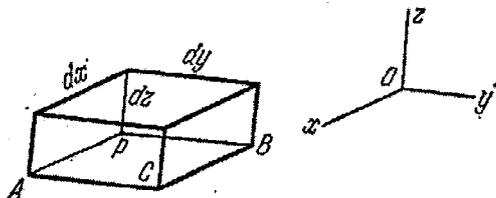


Рис. 1.3. Малый элемент деформируемого тела.

Пусть u , v , w – компоненты перемещения точки P . Тогда перемещение соседней точки A в направлении оси Ox с точностью до величин первого порядка можно записать:

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx.$$

Увеличение отрезка длины PA при деформации равно $\frac{\partial u}{\partial x} dx$, а относительное удлинение $\frac{\partial u}{\partial x}$. Также можно показать, что относительные удлинения в направлении y и z будут равны $\frac{\partial v}{\partial y}$ и $\frac{\partial w}{\partial z}$. Теперь определим, как изменяется первоначально прямой угол между отрезками PA и PB . Перемещения точки A в направлении y и точки B в направлении x будут соответственно равны $v + \frac{\partial v}{\partial x} dx$ и $u + \frac{\partial u}{\partial y} dy$. В результате новое направление отрезка $P'A'$ образует с первоначальным направлением PA малый угол $\frac{\partial v}{\partial x}$, а новое направление отрезка $P'B'$ образует с отрезком PB угол $\frac{\partial u}{\partial y}$ (рис. 1.4). Суммарное изменение угла равно $\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$ – это есть деформация сдвига между плоскостями

xz и yz . Аналогичным образом можно получить выражения для деформации сдвига между плоскостями xu и xz , а также между плоскостями ux и yz .

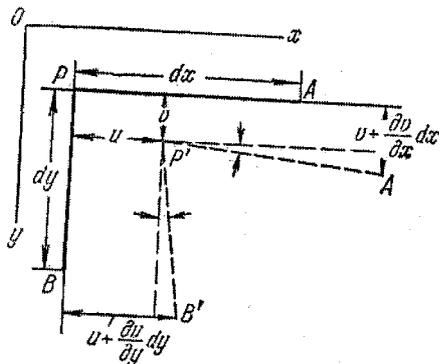


Рис. 1.4. Деформации растяжения и сдвига в твердом теле.

Относительные удлинения обозначаются буквой ε , относительная деформация сдвига буквой γ . Для указания направления деформации используются те же индексы, что и для компонент напряжений. Деформация в любой точке твердого тела задается 6 компонентами деформации:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z};$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}.$$

Все имеющиеся в природе материалы можно разделить на *хрупкие* и *пластичные*. Хрупкие материалы разрушаются при небольших деформациях, а разрушению пластических предшествуют значительные пластические деформации. Пластичностью называется свойство материалов получать под действием достаточно больших нагрузок остаточные (пластические) деформации, которые не исчезают при снятии нагрузки. К пластичным материалам относятся практически все стали, бронзы, латунь, титановые и алюминиевые сплавы. К хрупким – инструментальные, пружинные, некоторые специальные типы стали, чугун, бетон, камень, лед.

Возможность проявления материалом хрупких или пластических свойств зависит не только от его физической природы, но и от других физических факторов, таких как внешние условия (температура, наличие агрессивных сред, радиация и т.п.), характер и скорость нагружения и т.д. Известны опыты, в которых при больших скоростях нагружения струя воды разрушалась как хрупкое тело. Поэтому более правильно говорить не о пластичных и хрупких материалах, а о пластичных и хрупких состояниях материалов.

1.2. Диаграммы растяжения – сжатия материалов

Наиболее полную информацию о механических свойствах материалов получают при их испытаниях. Несколько позже мы подробно рассмотрим применяемые в настоящее время технологии испытания материалов. Сейчас обсудим только некоторые результаты таких испытаний, которые позволяют определить прочностные свойства материалов.

Наиболее простым методом испытаний являются испытания материалов на растяжение сжатие. В ходе проведения таких испытаний получают зависимость между приложенным усилием, растягивающим или сжимающим образец, и удлинением образца. Такая зависимость называется *диаграммой растяжения (сжатия)*. Обычно эта диаграмма задается в координатах напряжение – относительное удлинение. При определении напряжений растягивающее (сжимающее) усилие относится к первоначальной площади сечения образца.

Рассмотрим диаграмму растяжения на примере малоуглеродистой стали и чугуна. Типичная диаграмма растяжения малоуглеродистой стали, получаемая в результате испытаний, показана на рис. 1.5. До величины напряжения σ_p (*предел пропорциональности*), которое соответствует точке *B* на диаграмме, наблюдается линейная зависимость между относительным удлинением и нагрузкой. При разгрузке образец материала принимает исходную форму. На этом участке выполняется закон Гука (пропорциональности). Для случая растяжения сжатия этот закон может быть записан следующим образом:

$$\sigma_x = E\varepsilon_x,$$

где E – модуль Юнга (упругости) материала, Н/м^2 . Модуль Юнга является константой для данного материала.

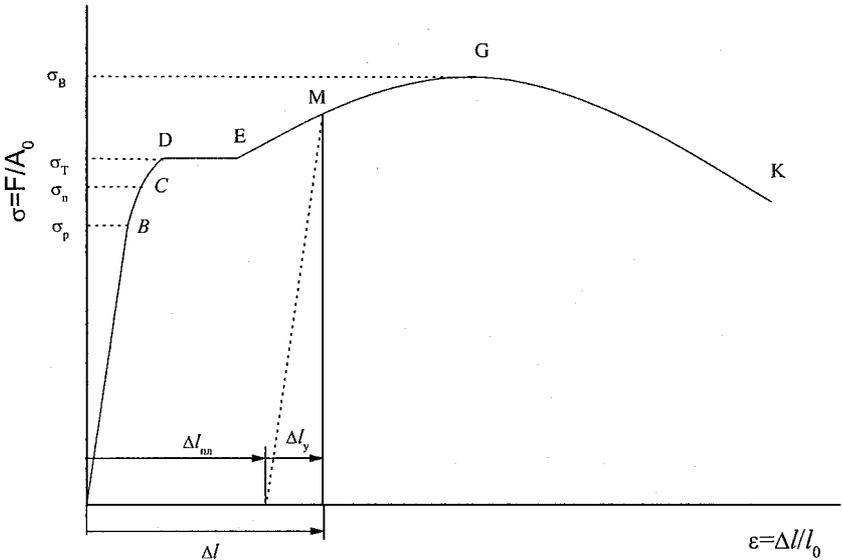


Рис. 1.5. Типичная диаграмма растяжения пластичного материала (малоуглеродистая сталь).

Относительное удлинение в направлении оси Ox приводит к появлению поперечных деформаций рассматриваемого тела. Эти поперечные деформации связаны с продольной следующими соотношениями:

$$\varepsilon_y = \nu\varepsilon_x; \quad \varepsilon_z = \nu\varepsilon_x,$$

где ν – коэффициент Пуассона – константа материала, характеризующая его упругие свойства. Для большинства материалов ν изменяется в пределах от 0,25 до 0,35. Ниже в табл. 1.1 приведены некоторые упругие постоянные конструкционных материалов при нормальной температуре.

Упругие постоянные некоторых конструкционных материалов
при нормальной температуре

Материал	Модуль Юнга E , МПа	Коэффициент Пуассона ν
Сталь	$(2-2,2)10^5$	0,25–0,33
Медь, бронза, латунь	10^5	0,30–0,35
Алюминий и его сплавы	$(0,7-0,8)10^5$	0,32–0,36
Чугун	10^5	0,24–0,28
Сплавы титана	$(1,1-1,3)10^5$	
Дерево вдоль волокон	10^4	
Стеклопластики	$(1,5-4)10^4$	

При дальнейшем нагружении прямая OB переходит в кривую BC с выпуклостью вверх. Это означает, что относительное удлинение возрастает интенсивнее, чем напряжения. Однако до точки C с ординатой σ_n , где n обычно имеет значение 0,01, 0,02 или 0,05, показывающие при какой остаточной относительной деформации выполнено измерение, можно считать, что материал обладает упругими свойствами. Эта величина называется пределом упругости. Как следует из приведенных выше численных значений, остаточная относительная деформация в этом случае еще крайне мала.

При дальнейшем возрастании нагрузки кривая BD переходит в горизонтальную или почти горизонтальную прямую DE , на которой при практически постоянных значениях напряжения происходит увеличение относительного удлинения образца – материал «течет». Горизонтальный участок DE называется *площадкой текучести*, а ордината этого участка соответствует механической характеристике материала – *пределу текучести* σ_T . Пластическое течение представляет собой массовое перемещение атомов материала по определенным плоскостям (плоскости скольжения) и направлениям кристаллической решетки. В результате наблюдаются процессы скольжения или двойникования атомных слоев материала относительно соседних. При скольжении образуется обыкновенный сдвиг одной части кристаллической решетки относительно другой. При двойниковании перемещение атомов в определенной, ограниченной части материала осуществляется таким образом, что одна часть материала оказывается как бы повернутой по отноше-

нии другой ее части, занимая по отношению к ней симметричное положение. При пластическом течении на поверхности растягиваемого образца под углом 45° появляются так называемые линии Чернова – Людерса, являющиеся следами взаимных перемещений отдельных объемов материала при напряжениях, соответствующих площадке текучести.

По мере удлинения образца начинает возрастать сопротивление материала растяжению (кривая EG диаграммы). Этот процесс называется *упрочнением*. Упрочнение характеризуется ростом напряжения (правда не столь интенсивным, как в зоне упругости) и значительным уменьшением площади поперечного сечения образца. Точка G диаграммы соответствует наибольшей нагрузке, воспринимаемой образцом. Напряжение, соответствующее этой точке σ_B , является важнейшей характеристикой материала и называется *временным сопротивлением*.

До достижения максимальной нагрузки деформация равномерно распределялась по длине образца. После достижения максимальной нагрузки деформация локализуется в одном месте, называемом «шейкой» (рис. 1.6). Появление «шейки» свидетельствует о том, что упрочнение материала не компенсирует возрастание нагрузки, возникающее из-за уменьшения площади сечения образца. При дальнейшем увеличении относительного удлинения происходит уменьшение напряжений вплоть до момента разрушения образца в точке K .

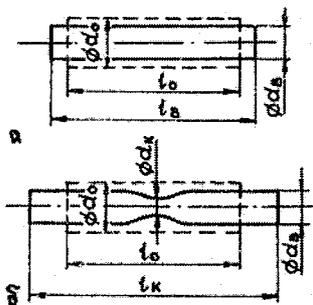


Рис. 1.6. Изменение формы и размеров рабочей части образца в процессе растяжения: a – в момент достижения нагрузкой максимального значения; b – в момент разрушения.

Если в любой момент (точка M на рис. 1.5) деформирования провести разгрузку образца, то она произойдет по прямой параллельной OB . Это означает, что разгрузка подчиняется закону Гука. При этом полное относительное удлинение образца состоит из упругой Δl_y и пластической частей $\Delta l_{пл}$.

Существует технологическая операция, позволяющая повысить величину предела пропорциональности стали за счет предварительного пластического деформирования. Эта операция называется *наклепом*. Она заключается в растяжении образца настолько, чтобы в нем возникли пластические деформации и в последующей его разгрузке. Если теперь снова нагрузить образец, то выяснится, что материал образца следует закону Гука практически до значений напряжений, соответствующих началу разгрузки. При наклепе существенно ухудшаются пластические свойства материала. Если совместить наклеп с длительной выдержкой образца после наклепа (старением), можно еще повысить предел пропорциональности и увеличить временное сопротивление материала.

Полученные выше механические характеристики прочности материала являются условными, так как они определяются без учета изменения площади поперечного сечения образца в процессе деформирования. На начальных стадиях деформирования эти различия пренебрежимо малы, но к моменту достижения наибольшей нагрузки уменьшение площади поперечного сечения может достигать 15%, а при разрушении материала – 70%. Поэтому наряду с условными предельными напряжениями используются истинные напряжения. Для их определения строится диаграмма истинных напряжений. Диаграмма строится в координатах $S - \psi$. S истинное напряжение, рассчитываемое по формуле $S = \sigma \frac{A_0}{A(\epsilon)}$, здесь A_0 – площадь начального сечения образца, $A(\epsilon)$ – текущая величина площади образца в функции от относительного удлинения. Величина ψ называется относительным остаточным сужением и определяется по формуле $\Psi = \frac{A_0 - A(\epsilon)}{A_0}$. Построение диаграммы истинных напряжений (рис. 1.7) начинают с точки D стандартной диаграммы, соответствующей началу площадки текучести. Истинные напряжения, соответствующие пределу текучести, временно-му сопротивлению и разрушению материала рассчитывают по приведенной выше формуле. Как следует из этой диаграммы, истинные напряжения постоянно возрастают вплоть до момента раз-

рушения. Между условными и истинными напряжениями существуют следующие соотношения:

$$\sigma_T < \sigma_B < S_B < S_K,$$

которые свидетельствуют о том, что упрочнение материала происходит до самого момента разрушения.

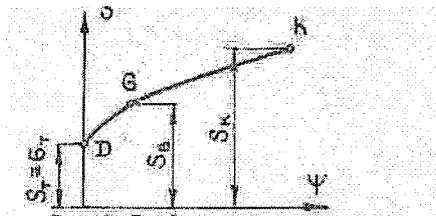


Рис. 1.7. Диаграмма истинных напряжений.

Рассмотрим теперь диаграмму растяжения хрупкого материала на примере чугуна (рис. 1.8). У хрупких материалов перед разрушением наблюдаются только упругие деформации, иногда незначительные пластические. У хрупких материалов, в том числе и у чугуна, часто наблюдается отклонение от закона Гука – связь между упругими деформациями и напряжением нелинейна.

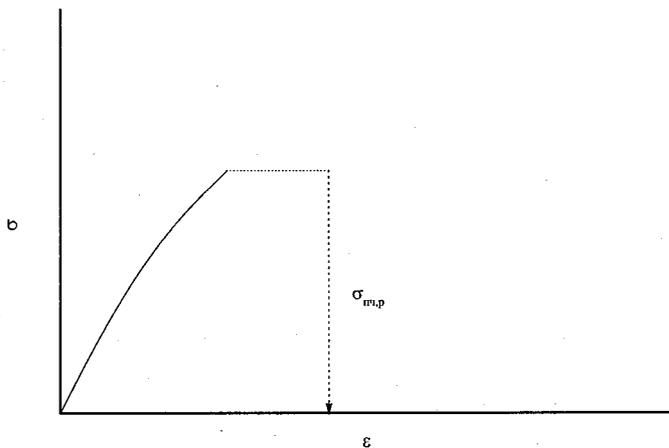


Рис. 1.8. Диаграмма растяжения хрупкого материала (чугуна).

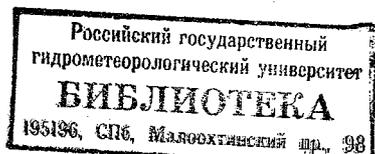
Однако это отклонение обычно невелико, поэтому во многих приложениях можно в первом приближении считать закон Гука справедливым. По результатам испытаний на растяжение хрупких материалов определяют *предел прочности на растяжение* $\sigma_{нч,р}$.

Другим распространенным типом испытаний материалов, позволяющим получить данные об их механических свойствах, является испытание на сжатие. Материалы, обладающие хорошими пластическими свойствами (сталь, медь алюминий), при сжатии не разрушаются. Материалы с ограниченной пластичностью (латунь, бронза, титановые и алюминиевые сплавы), а также хрупкие материалы, при сжатии разрушаются. Характер деформирования и разрушения материалов, особенно хрупких, сильно зависит от сил трения, возникающих между подушками пресса и торцами образца. Необходимо стремиться уменьшить эти силы.

Для пластичных и ограничено пластичных материалов значения пределов пропорциональности и текучести совпадают с аналогичными значениями, полученными при испытаниях на растяжение. Хрупкие материалы обладают повышенной сопротивляемостью к сжатию, поэтому у них величина предела прочности может в несколько раз превышать предел прочности при растяжении. На практике испытания на сжатие обычно проводят для оценки свойств хрупких материалов.

Рассмотрим диаграммы сжатия различных материалов. На рис. 1.9 показана диаграмма сжатия малоуглеродистой стали. На этой диаграмме хорошо различимы предел пропорциональности и предел текучести. Дальнейшее увеличение относительной деформации приводит лишь к росту напряжения. На этом же рисунке показан внешний вид образца в процессе испытаний и после его завершения. На рис. 1.10 приведена диаграмма сжатия материала с ограниченной пластичностью. На этой диаграмме отсутствует площадка текучести. В точке *G* диаграммы происходит разрушение материала. Ордината этой точки определяет предел прочности материала на сжатие. Здесь же представлен внешний вид образца до и после испытаний. Видно, что в процессе нагружения образец принял бочкообразную форму и разрушился в результате образования трещин, ориентированных под углом 40 – 50° к оси образца.

уч. к. 1338



Такой характер расположения трещин свидетельствует о разрушении путем сдвига под действием касательных напряжений.

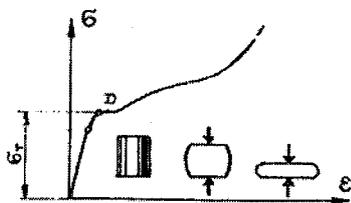


Рис. 1.9. Диаграмма сжатия стали и изменение внешнего вида образца в процессе нагружения.

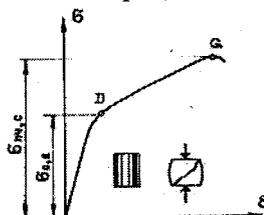


Рис. 1.10. Диаграмма сжатия титанового сплава и характер разрушения образцов во время испытаний.

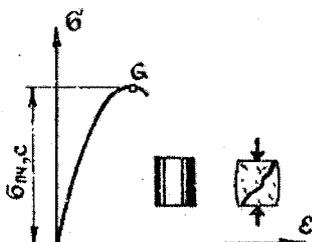


Рис. 1.11. Диаграмма сжатия чугуна и вид образца после испытаний.

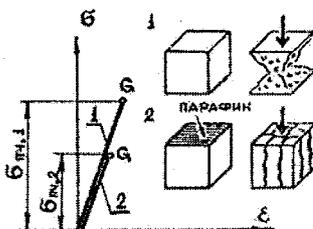


Рис. 1.12. Диаграмма сжатия цемента и вид образцов после испытаний: 1 – большое трение; 2 – малое трение.

При сжатии хрупких материалов практически до самого разрушения наблюдаются упругие (линейные или нелинейные) деформации. Иногда у некоторых материалов, например, у чугуна можно обнаружить незначительные пластические деформации. У чугуна они проявляются в некоторой бочкообразности образца перед разрушением. На рис. 1.11 и 1.12 показаны диаграммы сжатия чугуна и цемента. На диаграмме сжатия цемента приведено две зависимости, одна из которых соответствует случаю значительного трения между подушками пресса и торцами образца, а вторая – уменьшенному (торцы образца были смазаны парафином). При снижении трения предел прочности цемента уменьшается примерно в 2 раза, при этом также изменяется картина разрушения образца.

Представляет интерес диаграмма сжатия анизотропного материала, мы рассмотрим ее на примере древесины (рис. 1.13). При

сжатии древесины вдоль волокон диаграмма сжатия напоминает диаграмму сжатия чугуна. При сжатии же поперек волокон в начале нагружения наблюдается зависимость, подчиняющаяся закону Гука. При достижении некоторого значения сжимающего напряжения (достаточно низкого) образец начинает деформироваться практически при постоянном напряжении. В древесине могут возникать значительные относительные деформации (30% и более), она значительно уплотняется. Принято считать, что древесина сохраняет несущую способность до тех пор, пока высота образца не уменьшится на одну треть.

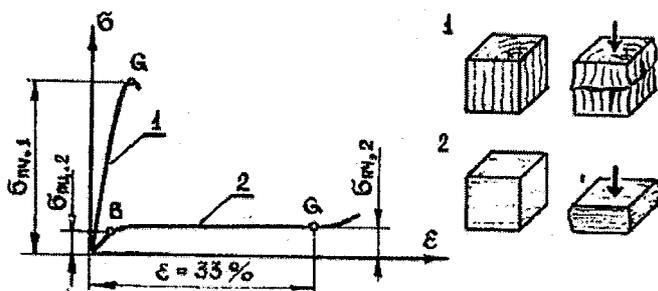


Рис. 1.13. Диаграммы сжатия древесины и вид образцов после испытаний:
1 – сжатие вдоль волокон; 2 – сжатие поперек волокон.

1.3. Современные концепции прочности материалов. Основные понятия теории трещин

Данные, полученные при испытаниях образцов в основном на растяжение – сжатие используют для разработки тех или иных критериев прочности. В настоящее время используется *механическая и кинетическая концепции прочности* материалов.

В соответствии с механической концепцией разрушение материала происходит при потере устойчивости твердого тела, находящегося в поле напряжений. Принимается, что для каждого материала существует некоторое пороговое значение механической характеристики тела (напряжения, деформации и т.п.), при котором происходит потеря устойчивости и разрушение. Ниже указанного порога тело устойчиво и разрушение не происходит ни за какое время.

В кинетической концепции особое внимание сосредоточено на процессе развития разрушения. Основными параметрами в этой концепции, помимо действующей нагрузки, являются время действия нагрузки и температура. Отечественными физиками разработана теория прочности, объясняющая разрушение с позиций физики твердого тела. Согласно этой теории для одноосного растяжения постоянной нагрузкой временное сопротивление материала σ_B зависит от абсолютной температуры T и времени действия нагрузки t :

$$\sigma_B = \frac{U}{\gamma} - \frac{RT}{\gamma} \ln \frac{t}{\tau_0}, \quad t > \tau_0,$$

где U – энергия активации; γ – структурная постоянная; R – газовая постоянная; τ_0 – время пробега упругой волны на межатомное расстояние ($\tau_0 \approx 10^{-12}$ с). Из приведенной формулы следует, что разрушение материала может происходить при любом сколь угодно малом значении временного сопротивления при условии, что время действия нагрузки неограниченно.

Рассмотрим различные механические теории прочности:

– теория Галилея. Разрушение не происходит, если

$$\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) < \sigma_B,$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; σ_B – временное сопротивление;

– теория Понселе. Разрушение не происходит, если

$$\max(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) < \varepsilon_B,$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные напряжения; ε_B – предельно допустимая деформация;

– теория Кулона. Разрушение не происходит, если

$$\max(\tau_n - |\sigma_n| \operatorname{tg} \rho) < k,$$

где τ_n, σ_n – касательное и нормальное усилия на площадке с вектором нормали \mathbf{n} , максимум ищется среди всех возможных ориентаций вектора \mathbf{n} в данной точке, k – коэффициент сцепления, ρ –

угол внутреннего трения. При $\rho = 0$, что справедливо, например, для металлов, предыдущее выражение можно переписать следующим образом:

$$\max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_1 - \sigma_3|, |\sigma_2 - \sigma_3|) < 2k.$$

Теория Кулона в основном применяется для описания разрушения сдвигом.

Теория Мора. Разрушение не происходит, если

$$\max[\tau_n - f(\sigma_n)] < 0,$$

функция $f(\sigma_n)$ определяется экспериментально для каждого материала в отдельности.

В рамках описанных выше теорий различные факторы, которые могут оказывать влияние на процесс разрушения, такие как длительность и нестационарность нагружения, температура, число циклов нагружения и т.д., учитываются путем введения зависимостей постоянных материала $\sigma_B, \varepsilon_B, k, \rho$ от этих факторов. Указанные зависимости определяются экспериментально.

Существенным недостатком всех приведенных теорий прочности является их ориентация на простые случаи нагружения. В большинстве практически важных случаев тело находится в сложном нагруженном состоянии. В этой ситуации выполнение какого-либо из сформулированных выше критериев прочности не приводит к разрушению всей конструкции. Фактически в опасной зоне возникает либо пластическая зона, либо образуется трещина, которые развиваются с увеличением нагрузки. Поэтому в последнее время большое развитие получила теория трещин, в рамках которой рассматривается поведение конструкций с трещинами.

Раскрытие трещины в твердом теле может быть осуществлено только тремя способами, как это показано на рис. 1.14. Тип I – при нормальных напряжениях перемещения берегов трещины перпендикулярны плоскости трещины (колка дров); тип II – трещина плоского сдвига, перемещения берегов происходят в плоскости трещины и перпендикулярно ее фронту (снятие стружки при токарных работах); тип III – антиплоский сдвиг, перемещения берегов совпадают с плоскостью трещины (ножницы).

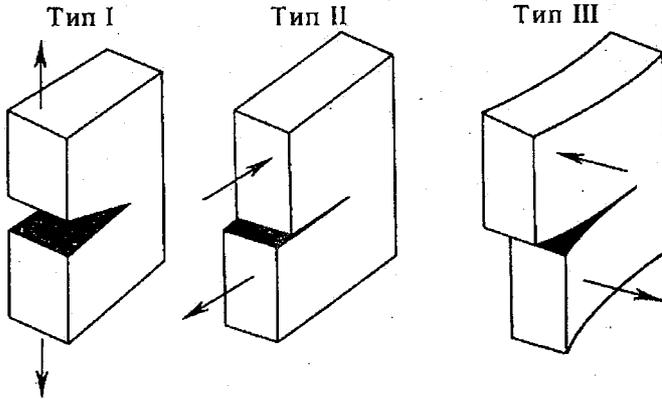


Рис. 1.14. Типы трещин, возникающие в твердом теле.

Рассмотрим сквозную трещину I типа длиной $2l$ в бесконечной пластине, находящейся под действием приложенных на бесконечности растягивающих напряжений σ . Поле напряжений в окрестности кончика трещины можно представить в виде:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta), \quad (1.1)$$

где $K_I = \sigma\sqrt{\pi l}$ – коэффициент интенсивности напряжений, индекс I означает, что запись относится к трещине первого типа; r, θ – полярные координаты с началом в вершине трещины точки, в которой определяются напряжения. Указанные напряжения получают из решения упругой задачи, формально они допускают существование бесконечных напряжений в вершине трещины (пунктирная кривая на рис. 1.15). В действительности этого не происходит, так как у носика трещины формируется зона пластичности. Размер этой зоны можно оценить, приравняв действующие в окрестности трещины напряжения пределу текучести материала:

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_p}} = \sigma_T \Rightarrow r_p = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_T^2} = 0,5l \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^2. \quad (1.2)$$

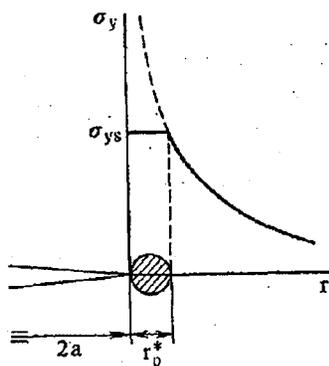


Рис. 1.15. Зона пластичности в вершине трещины.

Из выражения (1.1) следует, что поля напряжений в окрестности трещины зависят только от коэффициента интенсивности напряжений, т.е. если у двух различных трещин $K_I = \text{const}$, то поля напряжений у этих трещин одинаковые. Из формул (1.2) следует, что и пластическая зона определяется только коэффициентом K_I . Когда напряжения и деформации при вершине трещины достигнут критических значений, происходит раскрытие трещины. Это означает, что при равенстве $K_I = K_{Ic}$ произойдет разрушение. Считается, что K_{Ic} константа материала, которую называют *вязкостью разрушения*. Зная вязкость разрушения, можно определить критическое значение действующих напряжений. Например, для уже рассмотренной бесконечной пластины с центральной трещиной критические напряжения будут равны:

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi l}}.$$

Различие между подходами, базирующимися на традиционных теориях прочности и механике трещин, можно проиллюстрировать на простейшем примере – анализе прочности консольной балки, нагруженной на конце сосредоточенной силой. Наибольшие напряжения будут возникать на верхней поверхности балки у ее заделанного конца. Эти напряжения можно рассчитать по формуле

$$\sigma_{\max} = \frac{6PL}{bh^2},$$

где P – сила, действующая на балку; L , b и h – длина, ширина и толщина прямоугольной балки. Тогда в соответствии с теорией прочности Галилея разрушения балки при нагрузке P не произойдет, если

$$\sigma_{\max} < \frac{\sigma}{n},$$

где σ – предел прочности для хрупких материалов или предел текучести для пластичных; n – коэффициент запаса, который учитывает неточность изготовления, разброс свойств материала и т.д. Обычно этот коэффициент принимают равным 1,5 – 3,0. По классической теории прочности нагрузка на балку ограничивается следующим соотношением:

$$P < \sigma \frac{bh^2}{6Ln}.$$

Так как реальная конструкция всегда содержит дефекты, то величину безопасной нагрузки на балку можно оценить с позиции механики трещин. Будем предполагать, что дефект – трещина длиной l расположена в наиболее опасном корневом сечении балки. Коэффициент интенсивности напряжений для такой трещины будет равен:

$$K_I = 1,12\sigma_{\max}\sqrt{\pi l}.$$

По критерию эксплуатации конструкции с трещиной, предложенному Ирвином, безопасность будет обеспечена при выполнении условия

$$K_I < \frac{1}{m} K_{Ic},$$

где K_{Ic} – вязкость разрушения; m – коэффициент запаса, отличный от n . Из теории трещин получается следующая оценка эксплуатационной нагрузки:

$$P < \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi l}} \frac{bh^2}{6,72mL}$$

По внешнему виду оценки, полученные с помощью классической теории и механики трещин, близки. Геометрические размеры балки и прочностные характеристики материала σ и K_{Ic} входят в формулы идентичным образом. Однако последнее выражение содержит еще одну физическую характеристику – длину трещины l . Наличие этой величины позволяет проводить исследование несущей способности конструкции методами неразрушающего контроля. Этот факт открывает большие возможности для анализа безопасности конструкций с реальным распределением дефектов.

Осознание того факта, что реальные тела содержат различные дефекты строения (трещины, дислокации, включения и т.п.) позволило объяснить так называемый *масштабный эффект прочности*. Суть эффекта заключается в снижении прочности образца при увеличении его размеров. Объяснение масштабного эффекта заключается в том, что существует функция распределения дефектов в материале. В соответствии с этим чем больший объем материала подвергается нагружению, тем больше вероятность нахождения в этом объеме значительного дефекта, который может вызвать глобальное разрушение.

1.4. Усталость и ползучесть материалов

С развитием в материале трещин связано такое явление как *усталость*. Под усталостью понимают постепенное развитие трещины в материале под действием циклических нагрузок, причем уровень этих нагрузок может быть достаточно низким. На каждом цикле нагружения происходит незначительное подрастание трещины, и только когда она достигнет критической величины, происходит разрушение конструкции. Существует общая для всех материалов степенная зависимость между скоростью роста усталостной трещины и некоторой характеристикой цикла нагружения (закон Париса). В качестве такой характеристики может выступать размах (разность между наибольшим и наименьшим значениями

величины за цикл) полной деформации, напряжения или коэффициента интенсивности напряжения.

$$\frac{dl}{dN} = CA^m,$$

где l – полная длина трещины; N – число циклов; A – характеристика цикла нагружения; C, m – постоянная и показатель степени, определяемые из эксперимента.

На рис. 1.16 показаны экспериментальные кривые роста трещины при переменном растяжении.

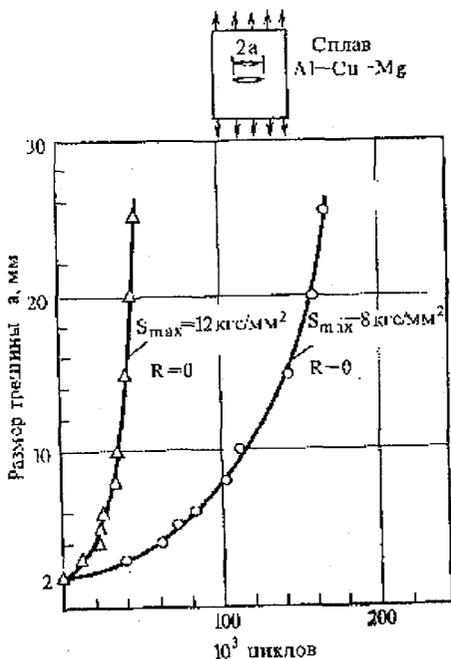


Рис. 1.16. Распространение усталостной трещины в сплаве:
 S_{\max} – амплитуда изменения напряжения.

Усталостная прочность материала характеризуется *пределом выносливости*, за который принимается наибольшее напряжение, когда образец выдерживает без разрушения заданное число циклов (например, 10^7 циклов).

Специальными исследованиями установлено, что часто усталостные трещины начинают расти с поверхности образца. Поэтому на возникновение усталости существенное влияние оказывает характер обработки поверхности образца. У полированного образца предел выносливости больше, чем, например, корродированного образца из того же материала. Внутри образца источником усталостных трещин могут быть различные включения и неоднородности материала.

Ранее уже упоминалось, что температура и длительность действия нагрузки могут оказывать влияние на прочностные свойства материала. Особенно ярко это проявляется при высоких температурах. При длительном действии постоянных во времени нагрузок возникающие в материале напряжения и деформации могут изменяться с течением времени. Это явление называется *ползучестью*. Понятие высокая температура существенным образом зависит от температуры плавления заданного материала. У сталей заметная ползучесть проявляется при температурах, превышающих 300 – 400 °С, у цветных металлов при температурах, превышающих 50 – 150 °С. Такие металлы, как свинец, алюминий, титан, цинк, «ползут» и при комнатной температуре.

Ползучесть может проявляться либо в росте пластических деформаций при постоянных напряжениях, либо в уменьшении напряжений при постоянной деформации. В последнем случае говорят, что напряжения *релаксируют*. При описании процесса ползучести материала строят два вида кривых: кривые ползучести (рис. 1.17), т.е. зависимости относительной деформации материала от времени при постоянном напряжении, и кривые релаксации – зависимости напряжения от времени при постоянной деформации (рис. 1.18). На кривой ползучести можно выделить три характерных участка: первый – неустановившаяся ползучесть, когда скорость деформации убывает; второй – установившаяся ползучесть, скорость деформации постоянна; третий – ускоряющаяся ползучесть, предшествующая разрушению.

Для описания ползучести используют предел длительной ползучести и предел ползучести. Пределом длительной ползучести называют наибольшее напряжение, при котором происходит разрушение образца за определенный промежуток времени. Пределом

ползучести называют наибольшее напряжение, при котором скорость пластической деформации или сама пластическая деформация не превышает заданной величины.

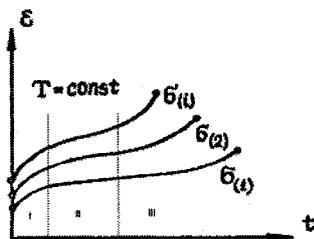


Рис. 1.17. Кривые ползучести при различных значениях растягивающих напряжений. I, II, III – характерные участки кривых ползучести.

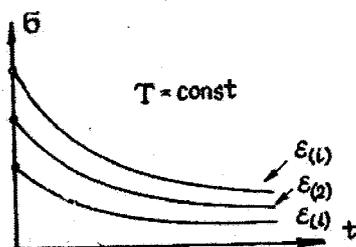


Рис. 1.18. Кривые релаксации для различных значений задаваемой деформации.

При изучении ползучести особо выделяют кратковременную ползучесть, под которой понимают такой процесс ползучести, где значительные деформации (порядка 2–3%) достигаются за время не более 10 с. Кривые кратковременной ползучести не имеют первых двух участков, а содержат только последний третий участок ускоряющейся ползучести.

2. Технологии испытаний материалов

Данные о прочностных характеристиках материалов являются исходной информацией при проектировании различных конструкций. Эти данные получают в процессе испытаний материалов на прочность. В предыдущем разделе, в котором изучались характеристики прочностных свойств материалов, уже рассматривались некоторые технологии испытаний материалов. В данном разделе эти технологии будут рассмотрены более подробно.

Одно из основных требований, предъявляемых к технологиям испытаний материалов, заключается в необходимости создания напряженного состояния материала во время испытаний близкого к состоянию материала в условиях, в которых происходит его эксплуатация. Исходя из этого требования, испытания материалов подразделяют на следующие основные виды:

- статические испытания на растяжение, сжатие, изгиб, кручение и срез;
- динамические испытания на ударную вязкость и ударный разрыв;
- испытания на выносливость;
- длительные испытания на жаропрочность и ползучесть.

Кроме этого, материалы испытывают на твердость, на износ, истирание и проводят различные технологические испытания.

Статические испытания проводят при плавном и постепенном возрастании деформации образца вплоть до разрушения. В любой момент испытаний с помощью специальных динамометров можно определить действующее в этот момент усилие.

При динамических испытаниях измеряют работу, затраченную на деформацию образца, прикладывая к нему динамические нагрузки. Величину динамических усилий обычно не измеряют из-за больших технических трудностей выполнения этой операции.

Испытания на выносливость проводят при нагружении образца повторными, циклически изменяющимися нагрузками. При этих испытаниях определяют величины опасных циклических напряжений и количество циклов нагружения, необходимых для разрушения образца.

Одновременное длительное воздействие на металл нагружения и повышенной температуры изучают при проведении испытаний на жаропрочность и ползучесть.

Твердость материалов определяют для оценки его сопротивления пластическому деформированию на поверхности или по сечению образца.

Испытания на износ и истирание позволяют выявить характер поведения поверхностных слоев материалов после длительного воздействия сил трения.

Очевидно, что при экспериментальном исследовании механических свойств материалов невозможно получить однозначный численный показатель того или иного свойства. Экспериментальные результаты имеют естественный разброс, поэтому для получения численных значений используют статистические методы обработки данных экспериментов. Обычно в качестве результата испытаний принимают среднее значение, полученное по всей со-

вокупности данных. После определения закона распределения находят доверительные интервалы для полученного результата.

Учет дефектности материала (в основном наличие в нем микротрещин) при обработке результатов прочностных испытаний позволяет внести некоторые уточнения в традиционную методику. Эти уточнения касаются предложения использовать в качестве обобщенного результата испытаний медиану распределения, вместо обычно используемого математического ожидания. На самом деле, вид функции плотности распределения прочностных свойств материалов, полученный по результатам испытаний, часто существенно отличается от нормального распределения. Из теории вероятности известно, что асимметрию закона распределения некоторой случайной величины может вызвать действие некоторого неучтенного случайного фактора. Другими словами, получаемое распределение является *производным*, связанным функционально с некоторой исходной случайной величиной.

При рассмотрении прочностных свойств в качестве такой величины логично выбрать *дефектность* D_i , под которой будем понимать распределение дефектов структуры (трещин). Тогда прочность материала будет задаваться некоторой функцией вида $\sigma = f(D_i)$. Понятие дефектности использовать выгоднее, чем длину трещин, так как оно может быть представлено в нормированном виде $0 \leq D_i \leq 1$. В простейшем случае растяжения – сжатия дефектность можно интерпретировать следующим образом:

$$D_i = R \frac{l_i}{l_{\max}},$$

где l_{\max} – максимально возможный размер дефекта; R – коэффициент связи.

При неслучайной связи между двумя случайными величинами их плотности вероятности связаны соотношением

$$\frac{\varphi_D(D_i)}{\varphi_\sigma[f(D_i)]} = f'(D_i),$$

где $\varphi_D, \varphi_\sigma$ – плотности вероятности дефектности и прочности соответственно; f' – первая производная функции связи. При такой трансформации одной плотности вероятности в другую однозначно соответствуют друг другу квантили распределения, т.е. решения уравнения $F(x) = p$, где $F(x)$ – функция распределения случайной величины x , p – вероятность. Поэтому однозначно соответствуют и медианы Me распределений, которые являются квантилями при $p = 1/2$ (рис. 2.1).

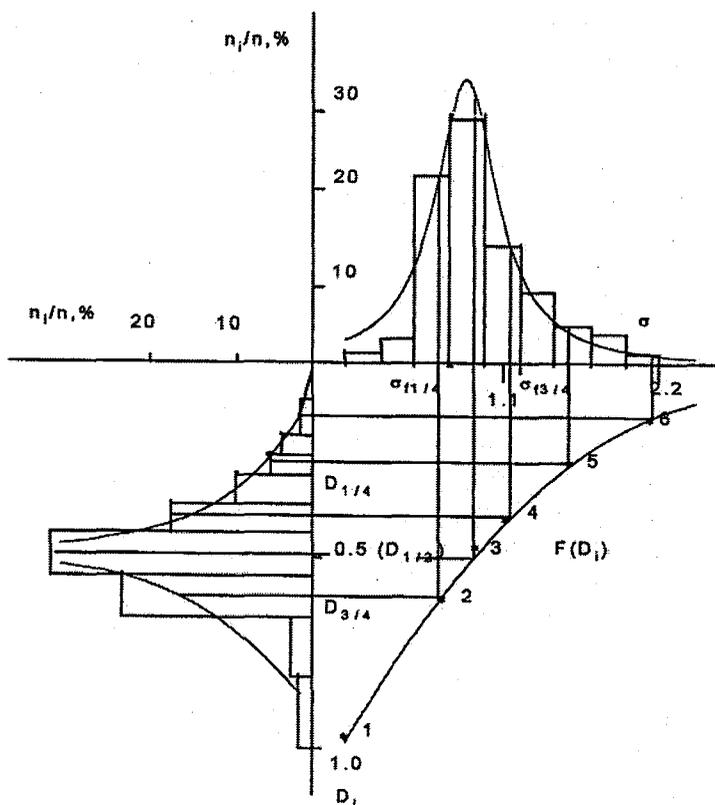


Рис. 2.1. Трансформация закона распределения при неслучайной связи между случайными величинами.

Мы предположили, что распределение дефектности материала неотягощено влиянием неслучайных факторов, поэтому можно считать, что оно подчиняется нормальному закону распределения. Поскольку у нормального закона математическое ожидание и медиана совпадают, медиану распределения ϕ_{σ} следует считать обобщенной характеристикой прочности, которая более корректно описывает результаты испытаний, чем математическое ожидание.

Использование квантилей распределений дефектности и прочности позволяет полностью восстановить неизвестную функцию связи и с ее помощью корректно установить доверительные границы погрешности обобщенного результата измерения характеристик прочности. При заданной доверительной вероятности эти границы оказываются несимметричными относительно медианы распределения.

2.1. Испытания на растяжение – сжатие

Статические испытания на растяжения и сжатие дают возможность определить следующие основные механические характеристики материалов:

- величины усилий (в Н) или напряжения (Н/м^2), которые испытывает образец при деформировании;
- величины абсолютных (в мм) или относительных (в %) упругих и пластических деформаций образца;
- величины полной (в Дж) и относительной (в Дж/м^3) работы сопротивления образца при его деформировании.

Стандартная методика определения основных механических характеристик распространяется на черные и цветные металлы и изделия из них, исключая проволоку, трубы, листовый металл и ленты толщиной менее 0,5 мм. В соответствии с этой методикой определяются следующие характеристики:

- условный предел пропорциональности σ_p ;
- условный предел упругости σ_n ;
- предел текучести σ_T ;
- условный предел текучести $\sigma_{0.2}$;
- временное сопротивление σ_B ;

- истинное сопротивление разрыву S_k ;
- относительное удлинение после разрыва δ ;
- относительное сужение после разрыва ψ .

Почти все эти характеристики были подробно рассмотрены в предыдущем разделе. Далее будут описаны только некоторые вновь вводимые характеристики.

Условный предел пропорциональности вводится для материалов, которые не совсем точно подчиняются закону Гука. Условный предел пропорциональности – это напряжение, при котором зависимость между напряжением и относительным удлинением отступает от линейной на такую величину, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой в координатах σ - ϵ в точке определения σ_p увеличивается на 50% от своего значения на линейном участке.

Условный предел текучести определяется для тех материалов, диаграмма растяжения которых не имеет площадки текучести. Под условным пределом текучести понимают напряжение, при котором остаточное удлинение образца достигает величины 0,2%. Условный предел текучести обозначается $\sigma_{0,2}$. Определение величины условного предела текучести показано на рис. 2.2.

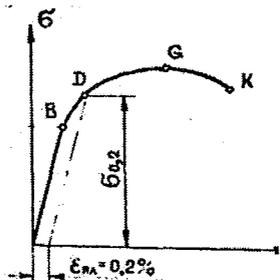


Рис. 2.2. Схема определения условного предела текучести.

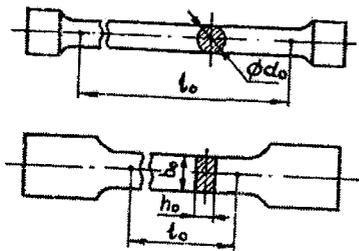


Рис. 2.3. Круглый и плоский образцы для испытаний на растяжение.

Работу сил при деформировании образца вплоть до его разрушения вычисляют по формуле

$$A = \int_{l_0}^l P dl.$$

Величина этого интеграла равна площади под кривой растяжения материала. Удельная работа деформации a определяется путем деления величины A на объем V той части образца, в пределах которой происходит деформация Δl : $a = A/V$.

Относительное удлинение образца δ – отношение длины образца после разрыва к его первоначальной длине, выраженное в процентах:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\%,$$

где l_k – длина образца после разрушения.

Для испытания на растяжение материалов используют образцы круглого или прямоугольного сечения. Основные геометрические характеристики образцов показаны на рис. 2.3. Как правило, диаметр рабочей части образца d_0 принимают равным 10, 15 или 20 мм. Длина цилиндрической части для коротких образцов определяется по формуле $l_0 = 5d_0$, а для длинных образцов по другой формуле $l_0 = 10d_0$. Для возможности сопоставления результатов испытаний круглых и плоских образцов длину плоских образцов принимают равной 5 или 10 диаметрам круглого образца с равно-великой плоскому образцу площадью сечения:

$$A_0 = b_0 h_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} \Rightarrow d_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_0} = 1,13\sqrt{A_0}.$$

Тогда длина короткого плоского образца будет $l_5 = 5,65\sqrt{A_0}$, а длинного – $l_{10} = 11,3\sqrt{A_0}$.

Для испытаний металлических материалов на сжатие используют цилиндрические образцы, для других материалов применяют также цилиндрические, либо кубические образцы. Основное требование, предъявляемое к этим образцам, заключается в том, чтобы их геометрические характеристики препятствовали возникновению продольного изгиба или перекоса, поэтому отношение высоты образца к поперечному размеру выбирают равной от 1 до 3.

2.2. Испытания на кручение

Кручение – это специфический вид деформации, при которой продольная ось призматического или цилиндрического образца не искривляется, а каждое поперечное сечение поворачивается вокруг оси по отношению к первоначальному положению на некоторый угол. Для получения деформации кручения к торцам образца прикладывают одинаковые по величине моменты, действующие в плоскости, перпендикулярной оси образца, и направленные в противоположные стороны. При этом реализуется напряженное состояние чистого плоского сдвига. Для испытаний на кручение обычно используют цилиндрические образцы с диаметром 10 мм, рабочая длина образцов составляет 5 или 10 диаметров.

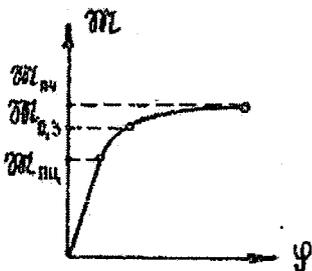


Рис. 2.4. Диаграмма кручения.

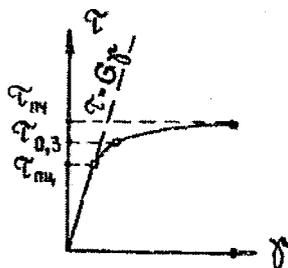


Рис. 2.5. Диаграмма сдвига.

В процессе проведения испытаний на кручение фиксируются значения закручивающего момента m от начала нагружения до разрушения образца и соответствующие ему углы закручивания φ на некоторой длине образца l . По полученным данным строится *диаграмма кручения* (рис. 2.4), а по ней *диаграмма сдвига* (рис. 2.5). При построении диаграммы сдвига касательное напряжение и относительная угловая деформация определяются по формулам:

$$\tau = \frac{Md}{2J_p}, \quad \gamma = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)d}{2l},$$

где M – крутящий момент, Н·м; l – расчетная длина образца, м; φ_1, φ_2 – угловые показатели на концах расчетной длины в радиа-

нах; $J_p = \frac{\pi d^4}{32}$ – полярный момент инерции цилиндрического образца, м^4 .

При испытаниях на кручение определяют следующие механические характеристики.

Модуль упругости при сдвиге кручением G (Н/м^2) определяется по формуле

$$G = \frac{Ml}{(\varphi_1 - \varphi_2)J_p},$$

относительный сдвиг при кручении γ – по формуле

$$\gamma = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)d}{2l} 100\%.$$

Предел пропорциональности и предел упругости. Эти величины определяются так же, как и в случае растяжения образца. Единственное отличие заключается в том, что при кручении действуют касательные напряжения. Закон Гука при сдвиге записывается следующим образом:

$$\tau = G\gamma.$$

Предел текучести при кручении $\tau_{0,3}$ – касательное напряжение, при котором образец получает остаточный сдвиг 0,3%.

Предел прочности на кручение – касательное напряжение, при котором происходит разрушение образца.

Образцы пластичных и хрупких материалов при кручении разрушаются по-разному, хотя они находятся в одинаковом напряженном состоянии. Разрушение стального образца происходит в поперечном сечении, в котором действуют максимальные касательные напряжения (рис. 2.6). Разрушение же чугунного образца происходит по винтовой поверхности, по которой действуют главные растягивающие напряжения. Такой характер разрушения образцов свидетельствует о том, что сопротивление пластичных и хрупких материалов сдвигу и отрыву различно: пластичные материалы хуже сопротивляются сдвигу, а хрупкие – отрыву.

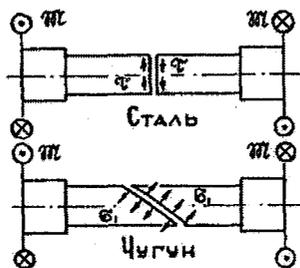


Рис. 2.6. Схемы разрушения стального и чугунного образцов при кручении.

2.3. Испытания на изгиб

Испытания на изгиб являются одним из наиболее распространенных видов испытаний. Чаще всего они используются при изучении свойств хрупких материалов. Распространенность этого вида испытаний определяется двумя факторами. Во-первых, у большинства конструкций и деталей машин при эксплуатации, возникают деформации изгиба. Во-вторых, даже при испытаниях на растяжение таких материалов, как чугун, бетон, керамика и т.п., невозможно идеально изготовить испытуемый образец, поэтому при его растяжении все равно возникают изгибные деформации, которые крайне сложно исключить при анализе результатов.

Прочность материалов на изгиб характеризуется *пределом прочности на изгиб* – напряжением, при котором происходит разрушение образца изгибом.

Наиболее распространенной схемой испытания образцов на изгиб является схема нагружения, в которой испытываемый образец располагается на двух опорах, а сосредоточенная нагрузка прикладывается посередине расстояния между опорами (рис. 2.7). В этой схеме наибольшие напряжения в образце возникают на его противоположной по отношению к месту приложения нагрузки поверхности (по середине образца). Величина напряжений рассчитывается по формуле

$$\sigma = \frac{M}{W},$$

где M – изгибающий момент, равный $M = \frac{Pl}{4}$; P – приложенная к образцу сила; l – расстояние между опорами; W – момент сопротивления сечения балки, равный $W = \frac{J_x}{e}$, здесь $J_x = \int z^2 dF$ (м^4) – момент инерции площади поперечного сечения балки относительно нейтральной оси; e – расстояние от нейтральной оси до наиболее растянутого волокна; dF – дифференциал площади сечения. Для круглого образца $W = \frac{\pi d^4 / 64}{d/2} = \frac{\pi d^3}{32}$ (м^3) и $W = \frac{bh^3 / 12}{h/2} = \frac{bh^2}{6}$ для прямоугольного; b, h – ширина и высота сечения балки.

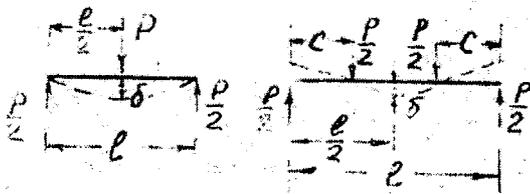


Рис. 2.7. Испытания материалов на изгиб по 3- и 4-точечной схемам.

При испытаниях на изгиб проводят измерения прогиба балки при разрушении. Эти измерения обычно осуществляют с точностью до 0,1 мм. Важность таких измерений определяется тем, что разрушение образца изгибом обычно происходит при достижении им 70 – 85 % от полной деформации упругости. Поэтому результаты измерения прогиба можно использовать для определения модуля упругости материала. В приведенной выше схеме нагружения модуль упругости может быть рассчитан по формуле

$$E = \frac{Pl^3}{48v_{\max} J_x},$$

где v_{\max} – максимальный прогиб по середине балки.

Образцы для испытаний на изгиб могут быть цилиндрическими или призматическими. Их размеры задаются следующим образом. При испытаниях чугуна используют цилиндрические образ-

цы, при расстоянии между опорами 600 мм диаметр образца должен быть 30 мм и общая длина образца 650 мм. При испытаниях пластмасс применяются призматические образцы толщиной 10 мм, шириной 15 мм и длиной 120 мм.

Испытывая бетоны, применяют схему четырехточечного изгиба (см. рис. 2.7). Изгибающий момент в центральном сечении балки определяется в этом случае по формуле

$$M = \frac{Pl}{3}.$$

2.4. Испытания на ударную прочность

В эксплуатации конструкции и детали машин нередко подвергаются воздействию ударных нагрузок, поэтому при их проектировании необходимо иметь информацию о сопротивляемости различных материалов ударным воздействиям. Для получения такой информации проводятся ударные испытания. Их осуществляют на специальных испытательных машинах, называемых копрами. По принципу действия копры подразделяются на вертикальные, маятниковые и ротационные.

Наиболее простым видом эксперимента является определение сопротивления образца повторным ударам на вертикальном копре. Для этого образец располагают на двух опорах или на наковальне, а удары наносятся с помощью бабы определенной массы, падающей с заданной высоты. Таким образом определяют величину работы деформации при определенном количестве ударов или при разрушении образца. Работу деформации при каждом ударе вычисляют по формуле

$$A = \frac{M}{2} (v^2 - v_1^2),$$

где M – масса бабы; v – скорость бабы до удара; v_1 – скорость бабы после удара.

Общая работа деформирования определяется суммированием работ, затраченных при каждом ударе.

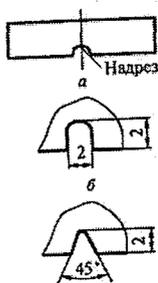


Рис. 2.8. Образцы для определения ударной вязкости.

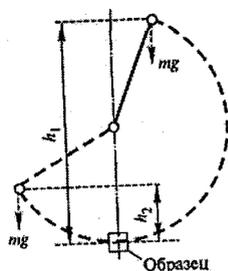


Рис. 2.9. Схема определения ударной вязкости.

Механические свойства металлов и сплавов в отношении их склонности к хрупкости при нестационарном распределении напряжений оценивают по результатам испытаний на маятниковых копрах. Испытания осуществляются одним ударом тяжелого молота, разрушающего образец с надрезом изгибом. Форма надреза в образце может быть U- или V-образной (рис. 2.8). В результате испытаний получаем характеристику, называемую *ударной вязкостью*, которую вычисляем по формуле

$$a = \frac{A}{F} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right],$$

где $A = mg(h_1 - h_2)$ – работа удара, затраченная на излом образца, Дж, m – масса маятника; h_1, h_2 – высота подъема маятника до и после удара соответственно; F – площадь поперечного сечения образца в месте надреза.

При проведении испытаний на маятниковых копрах нормируются следующие параметры: форма и размеры образца и надрезов; запас энергии маятникового копра; расстояние между опорами, на которых располагается образец; скорость ножа молота в момент удара по образцу; угол заострения ножа молота и др. На рис. 2.9 представлена схема определения ударной вязкости.

При динамических испытаниях определяется такая характеристика материала, как *хладоломкость*. Под хладоломкостью понимают хрупкое разрушение материалов (металлов) при действиях ударных нагрузок и низких температур. Для определения склонно-

сти металла к хладоломкости проводят динамические испытания при различных низких температурах. При некоторой температуре T_1 происходит резкое снижение ударной вязкости. Это снижение происходит в некотором диапазоне температур. Начиная с температуры T_2 зависимость ударной вязкости от температуры становится практически постоянной (рис. 2.10). Температуры T_1 и T_2 называются верхним и нижним порогами хладоломкости.

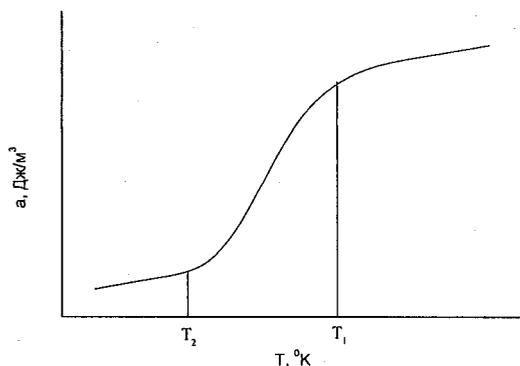


Рис. 2.10. Зависимость ударной вязкости от температуры (хладоломкость).

2.5. Испытания на выносливость (усталостную прочность)

Методы испытания на выносливость различаются по роду прилагаемого усилия и по условиям проведения испытаний. Образец подвергают многократному напряжению при растяжении, сжатии, изгибе кручении или комбинации этих нагружений. Повторное приложение усилий к образцу носит циклический характер. Циклом называют замкнутую однократную смену напряжений, проходящих непрерывный ряд значений. Циклы могут быть симметричные и асимметричные. Цикл характеризуется следующими величинами:

— амплитудой напряжений цикла $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$,

$$\tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2};$$

– коэффициентом асимметрии цикла $R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$, $R_\tau = \frac{\tau_{\min}}{\tau_{\max}}$;

– постоянным (средним) напряжением цикла
$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \quad \bar{\tau} = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2}.$$

Можно показать, что максимальные и минимальные напряжения выражаются через среднее значение напряжений и амплитуду, поэтому для полного описания цикла достаточно знать эти величины.

Важнейшими количественными показателями при испытаниях на выносливость являются: число циклов и предел выносливости σ_f .

При определении предела выносливости часто применяется метод Велера, при котором испытуемый образец предварительно подвергают действию знакопеременных напряжений, заведомо превышающих предел выносливости данного материала. У последующих образцов из этого же материала напряжения постепенно снижают до такого значения, при котором образец разрушается при заданном числе циклов. По результатам испытаний 6 – 8 образцов строится итоговая кривая в координатах напряжения – число циклов. Существует несколько способов обработки этой кривой для получения значения предела выносливости. Наиболее распространенной является процедура, при которой экспериментальная кривая перестраивается в другую с координатами напряжения – $1/N$. Значение предела выносливости определяется экстраполяцией кривой в точку $1/N = 0$, находящуюся на оси ординат (рис. 2.11).

Существуют ускоренные методы определения предела выносливости. Один из них заключается в измерении температуры испытуемого образца, подвергаемого знакопеременным нагрузкам. По результатам этих испытаний строится зависимость напряжений от температуры. Если температура незначительно изменяется с ростом напряжений, это означает, что напряжения не превысили предел выносливости. При напряжении, соответствующем пределу выносливости, выявляется резкое изменение температуры, которое определяется на графике по отклонению от прямой линии.

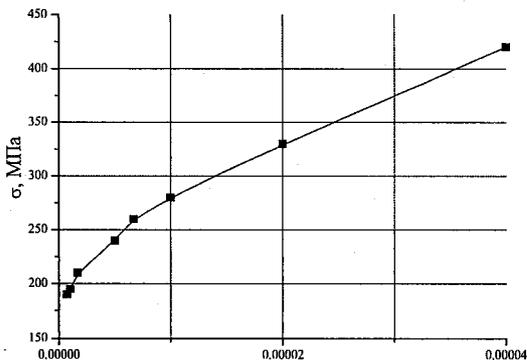


Рис. 2.11. Определение предела выносливости.

2.6. Испытания на твердость

Испытания на твердость относятся к числу довольно простых способов испытаний механических характеристик материалов, которые можно проводить практически в любых условиях. Здесь определяется его сопротивление деформированию при вдавливании наконечника (индентора). В качестве инденторов используют закаленный стальной шарик, алмазный конус или пирамидку. Величина твердости характеризуется размерами отпечатка, получаемого на поверхности образца. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования позволили связать результаты испытаний на твердость с временным сопротивлением и пределом текучести. Например, связь между числом твердости по Бринелю $HВ$ и временным сопротивлением для конструкционных сталей задается выражением

$$\sigma_B = (0,34 \dots 0,36) HВ.$$

Наиболее распространенным способом определения твердости материалов является метод Бринеля. Он заключается в вдавливании закаленного шарика в исследуемый материал с помощью заданной нагрузки, которая выдерживается в течение определенного времени. Число твердости по Бринелю определяют путем де-

ления величины нагрузки (в системе СГС) на площадь сферического отпечатка (в мм²):

$$HB = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)},$$

где P – нагрузка, кгс; D – диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм.

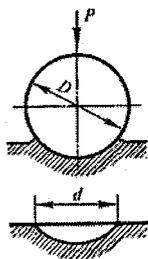


Рис. 2.12. Определение твердости по Бринеллю.

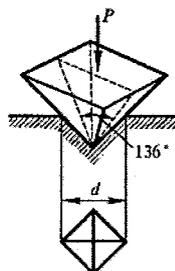


Рис. 2.13. Определение твердости по Виккерсу.

Диаметр шарика и величина нагрузки выбираются в зависимости от вида материала, его ориентировочной твердости и толщины образца. Соотношения между указанными величинами приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Выбор диаметра шарика и величины нагрузки при испытаниях по методу Бринеля

Материал	Интервал чисел Бринелля, HB	Минимальная толщина образца, мм	$\frac{P}{D^2}$	d , мм	Нагрузка		Выдержка под нагрузкой, с
					в кгс	в кН	
1	2	3	4	5	6	7	8
Черные металлы	140 – 450	От 6 до 3	30	10	3000	29,4	10
		От 4 до 2		5	750	7,35	
		Менее 2		2,5	187,5	1,84	
	До 140	Более 6	10	10	1000	9,81	30
		От 6 до 3		5	250	2,45	
		Менее 3		2,5	62,5	0,61	

Окончание табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Цветные металлы	130	От 6 до 3	30		3000	29,4	30
		От 4 до 2			750	7,35	
		Менее 2			187,5	1,84	
	35-130	От 9 до 6	10		1000	9,81	30
		От 6 до 2			250	2,45	
		Менее 3			62,5	0,61	
	8-35	Более 6	2,5		250	2,45	60
		От 6 до 3			62,5	0,61	
		Менее 3			15,6	0,15	

Другой методикой определения твердости является испытание материала по методу Роквелла. Твердость по этому методу определяют путем вдавливания стандартного алмазного наконечника в образец. К наконечнику последовательно прикладываются две нагрузки: предварительная P_0 и основная. P_1 . Общая нагрузка равна их сумме $P = P_0 + P_1$. Твердость по Роквеллу обозначают латинскими буквами HR , к которым добавляют еще одну латинскую букву, определяющую условия проведения испытаний:

C – испытание проходило при нагрузке $P_1 = 140$ кгс (1372 Н);

A – испытание проходило при нагрузке $P_1 = 50$ кгс (490 Н);

B – испытание проходило при нагрузке $P_1 = 90$ кгс (883 Н).

Величина предварительной нагрузки всегда составляет 10 кгс (98 Н).

Твердость по Роквеллу выражают в единицах условной шкалы и вычисляют как линейную функцию разности глубин, на которые последовательно вдавливают индентор под действием предварительной и основной нагрузки. За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению индентора на 0,002 мм.

$$HR = 100 - \frac{h - h_1}{0,002},$$

где h – глубина внедрения индентора под действием общей нагрузки; h_1 – внедрения индентора под действием предварительной нагрузки.

Определение твердости образца при вдавливании четырехгранной алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями 136° называется методом Викерса. Число твердости по Викерсу определяют путем деления нагрузки в кгс на поверхность отпечатка, выраженную в мм^2 :

$$HV = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2},$$

где d – длина диагонали отпечатка; α – угол между гранями пирамиды.

Благодаря выбранной форме индентора метод Викерса имеет ряд преимуществ по сравнению с распространенным методом Бринеля.

1. Отпечатки всегда получаются геометрически подобными и поэтому значения твердости одного и того же материала не зависят от силы вдавливания.

2. Отпечатки имеют четко очерченный квадратный контур и могут быть легко измерены.

3. Наблюдается почти полное совпадение чисел твердости по Викерсу с числами твердости по Бринелю. Различия отмечают при больших числах твердости $HB > 500$.

Наиболее часто метод определения твердости по Викерсу применяют для испытания очень твердых материалов, имеющих малое сечение, а также для испытаний твердости тонких наружных слоев, у которых специально повышена прочность.

2.7. Определение трещиностойкости материалов

В результате проведенных исследований для стандартных испытаний на трещиностойкость (вязкость разрушения) были рекомендованы образец для трехточечного изгиба и компактный образец для растяжения (рис. 2.14). Для обеспечения образования трещины в нужном месте все образцы должны иметь стартовые выточки заданных размеров.

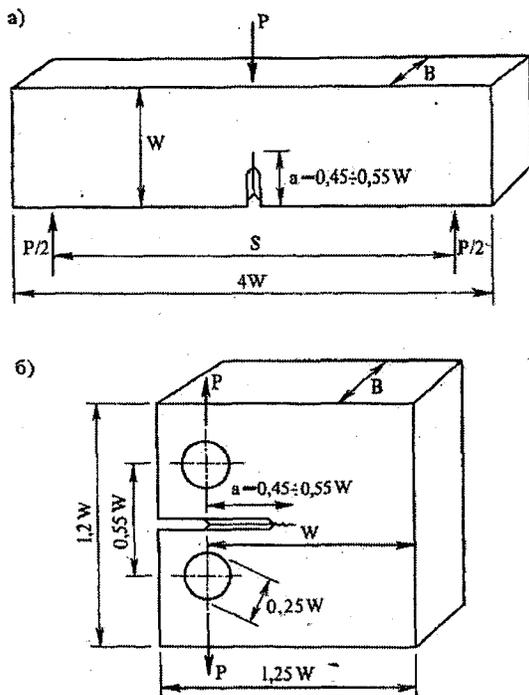


Рис. 2.14. Стандартные образцы для определения трещиностойкости при изгибе (а) и растяжении (б).

Для образца, работающего на изгиб, при определении трещиностойкости применяется следующее выражение:

$$K_{Ic} = \frac{PS}{B\sqrt{W}} \left[2,9 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{1}{2}} - 4,6 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{3}{2}} + 21,8 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{5}{2}} - 37,6 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{7}{2}} + 38,7 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{9}{2}} \right],$$

где P – нагрузка; B – ширина образца; W – толщина образца, $a = (0,45 - 0,55)W$ – длина стартовой выточки.

При испытаниях компактного образца трещиностойкость рассчитывается по формуле

$$K_{Ic} = \frac{P}{b\sqrt{W}} \left[29,6 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{1}{2}} - 185,5 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{3}{2}} + 655,7 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{5}{2}} - 1017 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{7}{2}} + 639 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{9}{2}} \right]$$

В табл. 2.2 приведены значения вязкости разрушения различных материалов.

Таблица 2.2

Вязкость разрушения материалов	
Материал	$K_{Ic}, \text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$
Сталь	11,06
Чугун	3,16
Дюраль	11,06
Древесина	0,85
Полистирол	0,41
Реакторный графит	0,13

2.8. Определение модулей упругости

Выше были рассмотрены основные технологии определения прочностных характеристик материалов. Знание этих характеристик необходимо при проектировании и изготовлении различных конструкций и деталей из этих материалов. Однако знание только прочностных характеристик не всегда бывает достаточным, так как в подавляющем большинстве конструкций и деталей при эксплуатации возникают только упругие деформации. Поэтому важное значение для определения их напряженного состояния имеют такие характеристики материала, как модули упругости. Физический смысл этих модулей проявляется при рассмотрении элементарных типов напряженного состояния твердого тела: нормального растяжения, чистого сдвига (кручения) и всестороннего нормального (гидростатического) сжатия. Существует простая зависимость между напряжениями и деформациями для каждого из этих напряженных состояний. В соответствии с этими зависимостями модули упругости являются отношениями напряжений к вызванным этим напряжениям деформациям и характеризуют способность материалов сопротивляться соответствующим деформациям.

Одноосное нормальное растяжение $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, ε – относительное удлинение.

Чистый сдвиг (кручение) $G = \frac{\tau}{\gamma}$.

Всестороннее сжатие $K = \frac{\sigma}{\Delta}$, $\Delta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ – относительное изменение объема; K – модуль объемного сжатия.

Коэффициент Пуассона ν представляет собой отношение относительного поперечного сжатия при одностороннем растяжении к относительному продольному удлинению. Этот коэффициент для большинства металлов лежит в пределах 0,3 – 0,35. При приближении напряжений в металле к пределу текучести $\nu \rightarrow 0,5$. Чем ближе коэффициент Пуассона к 0,5, тем меньше способность материала к изменению объема.

В однородном изотропном материале все модули упругости и коэффициент Пуассона связаны следующими соотношениями:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}.$$

Поэтому упругие свойства изотропного материала описываются любыми двумя константами.

Существует два метода определения модулей упругости: статический и динамический. При статическом определении модулей упругости образец нагружается некоторой заданной нагрузкой, при этом с помощью приборов, например, тензометров, измеряются соответствующие деформации. Модули упругости определяются расчетным путем. Эти характеристики могут быть определены не только из опытов, в которых реализуются простые напряженные состояния, но и при рассмотрении сложных напряженных состояний, например, при изгибе балок или пластин.

При динамических испытаниях используют зависимость между частотой колебаний образца и величиной модулей упругости. Так, в случае продольных колебаний образца определяется модуль Юнга, а при крутильных – модуль сдвига:

$$E = \frac{4\rho l^2 f_{\sigma}^2}{g}, \quad G = \frac{4\rho l^2 f_{\tau}^2}{g},$$

где ρ и l – плотность и длина образца; g – ускорение свободного падения; f_{σ}, f_{τ} – резонансные частоты продольных и крутильных колебаний соответственно.

Модули упругости материалов не являются строго постоянными характеристиками. Они зависят от химической чистоты материала, способов его обработки, температуры и т.п.

3. Основные виды материалов, применяемых в морских технологиях

3.1. Сплавы железа и углерода

Конструкционные материалы могут быть металлические, керамические, полимерные и композитные. Выбор материала для применения в конструкциях в основном определяется соотношением их прочностных и пластических свойств. Наилучшим соотношением из всех перечисленных материалов обладают металлические материалы, чем обусловлена их широкая распространенность. В мировом производстве конструкционных материалов доля металлических материалов превышает 90 %. Мировое производство стали к концу XX в. достигло отметки 800 млн т в год. В России разработано и используется около 2000 марок сталей.

Наиболее часто в морских конструкциях используются различные конструкционные материалы, полученные на основе сплавов железа с другими элементами периодической системы.

Железо – металл, широко распространенный в природе. Земная кора на 5,1% состоит из него. Существует две модификации железа: α и γ , имеющие разную плотность, магнитные и другие физические свойства. Модификация γ -железа существует только при высоких температурах от 910 до 1390 °С. В этой модификации хорошо растворяется углерод. В α -железе растворимость углерода зависит от температуры; так, при комнатной температуре в нем может раствориться до 0,006 % С, а при 723 °С – 0,02%.

Чистое (техническое) железо обладает невысокими прочностными свойствами, его предел прочности на растяжение $\sigma_B = 245$ МН/м², а твердость по Бринеллю 784 МН/м². У технического железа хорошие пластические свойства и высокая ударная вязкость, кроме этого оно обладает высокой магнитной проницаемостью и низкой коэрцитивной силой, что обусловило его широкое применение в электротехнике и приборостроении.

Широкое применение в технике нашли железуглеродистые сплавы, в которых углерод присутствует либо в виде графита, либо цементита – Fe₃C. В зависимости от количества углерода, содержащегося в сплаве, железуглеродистые сплавы делятся на углеродистые стали и чугуны, если же в сплав специально вводятся другие элементы (хром, никель, вольфрам, молибден и др.), то получают легированные стали и чугуны.

Металлографический анализ показывает, что в железуглеродистых сплавах образуется шесть структурных составляющих: феррит, аустенит, цементит, графит, ледебурит и перлит.

Феррит – твердый раствор внедрения углерода в Fe_α. Как указывалось выше, растворимость углерода в Fe_α мала, поэтому феррит часто отождествляют с Fe_α.

Аустенит – твердый раствор внедрения углерода или других элементов в Fe_γ.

Цементит – продукт химической реакции между железом и углеродом Fe₃C. Цементит обладает повышенной твердостью и хрупкостью.

Графит является одной из модификаций элементарного вещества углерод.

Две последние структурные составляющие не являются однородными. Они представляют собой смеси аустенита с цементитом – *ледебурит* и феррита с цементитом – *перлит*.

Углеродистыми сталями называются сплавы железа с углеродом, содержащие до 2 % углерода. На практике обычно содержание углерода не превышает 1,3 %, так как при увеличении содержания углерода стали становятся очень твердыми и хрупкими. Углеродистые стали – очень распространенный конструкционный материал. Выпуск этих сталей составляет 80 % общего объема

продукции черной металлургии. Углеродистые стали могут подвергаться термической и химико-термической обработке.

Процент содержания углерода в стали определяет ее физические свойства. При увеличении содержания углерода возрастает доля цементита, который препятствует развитию пластических деформаций, что увеличивает прочность, но снижает пластичность и вязкость. Наибольшую вязкость разрушения ($K_{Ic} = 100 - 120$ МПа/м^{1/2}) и пластичность ($\sigma_{0,2} = 500$ МПа) имеют углеродистые стали с пониженным содержанием углерода (до 0,3 %). Зависимость механических свойств стали от процента содержания углерода представлена на рис. 3.1.

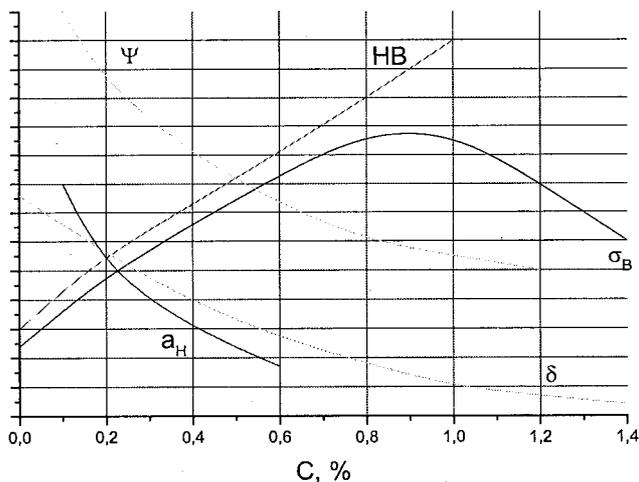


Рис. 3.1. Зависимость механических свойств стали от содержания в ней углерода.

Упрочнение материалов может быть достигнуто термической обработкой. Под термической обработкой понимают проведение процессов нагрева и охлаждения металлов и сплавов с целью изменения их структуры и свойств. Во время термической обработки металлы и сплавы находятся в твердом состоянии. Основными параметрами термической обработки являются температура и скорость нагрева, время выдержки материала при заданной температуре нагрева, скорость охлаждения. Так как все технологические

процессы при термической обработке протекают при определенной температуре и в течение определенного времени, их удобно представить в виде графика, построенного в координатах температура – время. Типичный вид такого графика представлен на рис. 3.2.

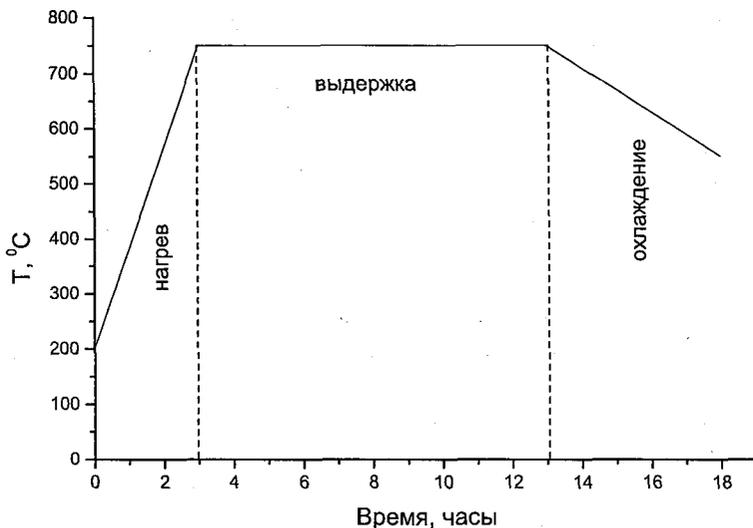


Рис. 3.2. График отжига углеродистой стали.

Различают следующие операции термической обработки: отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Отжигом называется технологическая операция, при которой материал нагревается до заданной температуры, выдерживается при этой температуре необходимое время для протекания в нем фазовых превращений, а затем медленно охлаждается. Целью отжига является разупрочнение металла для обеспечения хорошей обрабатываемости резанием и давлением, а также исправление дефектов структуры, которые возникают при горячей пластической деформации, литье и сварке. Часто в машиностроении отжиг является предварительной технологической операцией перед механической обработкой заготовки.

При *нормализации* материал тоже нагревают до температур фазовых превращений в твердом состоянии, но охлаждают на воздухе.

Если нагретый до температуры, при которой возможны фазовые превращения, материал быстро охладить, то такой технологический процесс называется *закалкой*. Углеродистые и низколегированные стали охлаждают в воде или в водных растворах солей и щелочей, а легированные стали в минеральном масле или в расплавленных солях.

Под *отпуском (старением)* понимают нагрев материала ниже температуры фазовых превращений и последующее плавное охлаждение. Такая операция приводит к некоторому снижению прочности, но существенно повышает пластичность.

Многие детали, изготовленные из стали, должны работать в условиях одновременного воздействия трения (изнашивания) и ударных нагрузок. У таких деталей должны быть твердые износостойкие поверхностные слои и вязкая середина, хорошо сопротивляющаяся ударным воздействиям. Для этого используется мягкая и вязкая углеродистая сталь, у которой с помощью специальных технологических приемов упрочняют поверхностный слой. Основными методами поверхностного упрочнения металлов являются: поверхностная закалка, химико-термическая обработка, пластическое деформирование.

Поверхностная закалка подразделяется на электротермическую, при которой нагрев изделий проводится токами ВЧ; газопламенную – нагрев производится пламенем ацетиленокислородной или газовой горелки; с нагревом в электролите. Все эти способы вызывают нагрев поверхности изделия до температур, при которых возможны фазовые превращения в твердом состоянии, например, перлит может переходить в аустенит. При этом существенно повышается прочность поверхностного слоя.

В химико-термической обработке используют цементацию – насыщение поверхностных слоев углеродом; азотирование – насыщение поверхности стали азотом; цианирование – поверхность одновременно насыщается углеродом и азотом; диффузионную металлизацию – насыщение поверхности стали металлами (хромом, алюминием, молибденом и т.д.).

Упрочнение путем поверхностного деформирования выполняют в холодном состоянии. Пластическое деформирование поверхности создают дробеструйной обработкой, накаткой роликами (для этого могут быть использованы обычные токарные и строгальные станки), чеканкой.

Помимо углеродистых сталей используются *легированные стали*, которые подразделяются на низколегированные, среднелегированные и высоколегированные.

Низколегированные стали содержат до 0,2 % углерода и до 2 – 3 % в основном недефицитных легирующих элементов. Их упрочнение основано на легировании феррита марганцем и/или кремнием. Стоимость низколегированных сталей несколько выше, чем у углеродистых, но они имеют лучший комплекс механических свойств, повышенную хладоломкость, лучшую свариваемость, повышенную износо- и коррозионную стойкость.

Среди низколегированных сталей выделяют *стали с карбонитридным упрочнением, малоперлитные стали и двухфазные феррито-мартенсиновые стали*. Карбонитридное упрочнение создается за счет дисперстных карбонитридов ванадия и титана или нитридов алюминия. Дисперсные карбонитриды способствуют измельчению аустенитного и действительного зерна стали, что положительно влияет на прочность, вязкость и хладоломкость.

Малоперлитные стали – это низколегированные стали с низким содержанием углерода (до 0,1 %). Они содержат до 2 % Mn, а также в разных сочетаниях ванадий (~0,1 %), ниобий (~0,06 %) и молибден (~0,15 ... 0,3 %). Эти стали используют для изготовления сварных конструкций в судостроении, мостостроении, транспортном и химическом машиностроении, магистральные газопроводы, эксплуатируемые в северных регионах.

Двухфазные феррито-мартенсиновые стали обладают структурой, представляющей собой мелкозернистую ферритовую матрицу с 15 ... 25 % мартенсита в виде отдельных островков. Эти стали предназначены для изготовления деталей холодной пластической деформацией (штамповкой, высадкой, вытяжкой, гибкой). Особенностью этих сталей является то, что окончательные их прочностные характеристики формируются в процессе изготовления из них изделий.

Существенное повышение прочности сталей достигается у *среднелегированных сталей*. Эти стали выплавляются в электродуговых печах с последующим вакуумно-дуговым переплавом. В табл. 3.1 приведена маркировка наиболее распространенных среднелегированных сталей, а также поставляемые промышленностью полуфабрикаты из этих сталей и рекомендуемые области применения.

Таблица 3.1

**Высокопрочные легированные стали.
Полуфабрикаты и рекомендованные области использования**

Сталь	Полуфабрикаты	Область применения	Температура эксплуатации, °С
30ХГСН2А	Поковки, штамповки, листы, трубы, прутки	Высоконагруженные детали (цилиндры, балки, работающие на срез шпильки и оси, групповые болты, нагруженные осевой силой)	-70 ... +250
40ХСН2МА	Поковки, штамповки, трубы, прутки	Высоконагруженные детали, не имеющие значительных концентраторов напряжения	-70 ... +250
25Х2ГНТА	Штамповки, листы, трубы, прутки, профили	Балки, болты, оси, нагруженные внутренним давлением сосуды	—

Механические свойства этих же сталей представлены в табл. 3.2. Как следует из приведенной таблицы, прочностные свойства среднелегированных сталей зависят от их термической обработки.

Уникальным комплексом механических свойств обладают *высокопрочные высоколегированные (мартенситно-старееющие) стали*. Им свойственна высокая прочность при достаточной пластичности и вязкости, а также повышенная хладостойкость, теплоустойчивость и коррозионная стойкость.

Таблица 3.2

Механические свойства высокопрочных среднелегированных сталей при нормальной температуре

Сталь	Термическая обработка	E		v	Растяжение			Кручение			Сжатие		Срез
		ГПа	G		σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_P	δ_{10} , %	τ_B	$\tau_{0,3}$	$\sigma_{0,2}$	τ	
30XГСН2А	Закалка при 900 °С, масло, отпуск при 290 °С, 1 ч	195	77	0,26	1750	1400	1100	8	1550	900	1500	1150	
	Изотермическая закалка с выдержкой при 330 °С	195	77	0,26	1600	1170	900	10	1400	870	—	1000	
40XСН2МА	Закалка при 900 °С, масло, отпуск при 220 °С,	195	77	0,26	2000	1500	1250	8	1700	—	1570	1200	
	Изотермическая закалка с выдержкой при 240 – 260 °С, отпуск при 240 – 260 °С	195	77	0,26	1900	1440	1180	8	1600	850	1500	1200	
25X2ГНТА	Закалка при 860 °С, отпуск при 200 – 250 °С	195	76	0,28	1500	1200	1050	8	1350	950	1400	950	

Основу мартенситно-старееющих сталей составляет безуглеродистый железоникелевый мартенсит (8 – 20 % Ni). Особенностью этих сплавов является процесс старения, при котором происходит изменение строения и свойств материала. Обычно при старении происходит упрочнение материала и ухудшение его пластических свойств. Старение материала происходит либо естественным путем при нормальной температуре, либо при термической обработке. Наличие Ni способствует увеличению объемной доли выделяющихся при старении упрочняющихся фаз.

Несмотря на высокую стоимость, мартенситно-старееющие стали нашли широкое применение в промышленности. В машиностроении их используют для изготовления элементов космической и ракетной техники, в криогенном машиностроении и авиастроении. В судостроении из этих сталей изготавливают корпуса подводных лодок и гребные винты. Широко используются такие стали при изготовлении различных инструментов.

Чугунами называют железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода от 2 до 6,67 %. Чугуны классифицируются по структуре, химическому составу, назначению и технологии получения.

В зависимости от того, в каком виде в чугуне сформировалась высокоуглеродистая фаза, различают:

- графитизированный чугун, характеризующийся наличием свободного графита (серый чугун);
- белый чугун, у которого в структуре отсутствует свободный графит;
- половинчатый, отбеленный чугун, поверхностный слой отливки которого состоит из белого чугуна, а центр – из серого.

Различие между белым и серым чугунами можно заметить по цвету излома. В белых чугунах весь углерод содержится в виде цементита, из-за чего излом этих чугунов имеет матово-белый цвет. В серых чугунах углерод частично или полностью выделяется в виде графита, что дает серый, а иногда и черный цвет излома.

По химическому составу различают нелегированный и легированный чугун.

По назначению чугуны могут быть разбиты на несколько групп:

– отливки из серого чугуна, применяемые в машиностроении. Они обладают хорошей обрабатываемостью и низкой стоимостью;

– отливки с повышенной прочностью и вязкостью из высокопрочного или ковкого чугуна;

– отливки с повышенной поверхностной прочностью из отбеленного чугуна или чугуна, подвергнутого закалке;

– отливки с резко выраженными специальными свойствами из легированных чугунов.

По технологии получения различают чугуны, отлитые в разовые печные формы, в оболочковые формы, в металлические формы (кокиль), в печные формы, изготовленные по газофицированным моделям, в керамические формы, изготовленные по выплавляемым или выжигаемым моделям. Последние два типа форм не имеют разъемов.

Изделия из чугуна получают в основном путем литья. Высокие литейные свойства, хорошая обрабатываемость резанием и небольшая стоимость обеспечивают широкое применение серых, высокопрочных и ковких чугунов для изготовления деталей машин. Благодаря смазывающему действию графита чугуны обладают антифрикционными свойствами, это их свойство используется для изготовления подшипников.

Физические свойства чугунов зависят от их состава. Наибольший интерес представляют такие физические свойства чугуна, как плотность, теплофизические свойства, удельное электрическое сопротивление, коррозионная стойкость.

Теплофизические свойства чугуна определяются теплофизическими свойствами его структурных составляющих и могут быть рассчитаны по правилу смешения:

$$A = \frac{a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n}{a_1 + a_2 + \dots + a_n},$$

где A – теплофизический параметр чугуна (коэффициент теплового расширения α , удельная теплоемкость c); x_1, x_2, \dots, x_n – α или c структурных составляющих (табл. 3.3); a_1, a_2, \dots, a_n – количественное содержание структурных составляющих.

Таблица 3.3

Теплофизические свойства структурных составляющих чугуна

Структурная составляющая чугуна	α , $1/^\circ\text{C}$, в диапазоне температур от 100 до 200 $^\circ\text{C}$	c , Дж/м $^\circ\text{C}$, в диапазоне температур от 0 до 100 $^\circ\text{C}$	λ , Вт/м $^\circ\text{C}$, в диапазоне температур от 0 до 100 $^\circ\text{C}$
Феррит	12,0 – 12,6	460 – 470	72,8 – 75,5
Аустенит	18 – 19	502	41,8
Цементит	6,0 – 6,5	615	49,0
Перлит	10,0 – 11,6	486	50,3 – 51,9
Графит	1,4 – 3,7	795	355,8

Из данных, приведенных в табл. 3.3, видно, почему правило смесей не применимо для определения теплопроводности чугуна. Теплопроводность графита почти на порядок превышает теплопроводность других структурных элементов. Теплопроводность чугуна в основном определяется содержанием в нем графита и находится в пределах $\sim 30 - 60$ Вт/м $^\circ\text{C}$.

Для практического использования могут представлять интерес данные о коррозионной стойкости различных чугунов в морской воде. Эти данные приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Коррозионная стойкость чугунов (скорость коррозии, мм/год)

Чугун	Условия эксплуатации		
	Промышленная атмосфера	Проточная водопроводная вода при 25 $^\circ\text{C}$	Морская вода*)
Белый	–	–	0,045
Серый	0,141	0,267	0,03 – 0,09
Высокопрочный ферритный	0,181	0,216	0,025 – 0,105
Высокопрочный ферритно-перлитный	0,151	0,235	–
Высокопрочный перлитный	0,141	0,285	0,05 – 0,07
Ковкий	–	–	0,045 – 0,08
Коррозионно-стойкий типа нерезист	–	0,049	0,02

*) При испытаниях в проточной морской воде скорость коррозии превышает аналогичные данные испытаний в простой воде.

Механические свойства чугуна как своеобразного композитного материала, зависят от характеристик металлической основы и формы, размеров и количества графитовых включений. На различные механические свойства решающее влияние может оказывать как металлическая основа, так и графитовые включения. Например, модуль упругости (Юнга) чугуна зависит от формы и величины графитовых включений, а твердость от свойств металлической основы. Временное сопротивление разрыву, ударная вязкость и длительная прочность зависят в одинаковой степени от включений графита и свойств металлической основы.

Большое влияние на механические свойства чугуна оказывают различные химические добавки. Часто используют Si и Al, которые являются графитизирующими элементами. Их использование улучшает пластические свойства чугуна. Применяют также различные малые добавки других элементов (Ni, Co, Cr, Mo, Ti, Ca, Mg и др.), которые влияют на структуру чугуна и, следовательно, на его механические свойства.

Основные механические свойства чугунов приведены в табл. 3.5.

3.2. Цветные металлы и их сплавы

Рассмотрим теперь цветные металлы и их сплавы. Необходимо сразу же отметить, что цветные металлы и их сплавы применяются реже, нежели железо и его сплавы – стали и чугуны. Это объясняется дефицитностью некоторых цветных металлов и большой сложностью их производства. Однако в некоторых отраслях промышленности цветные металлы и их сплавы широко используются благодаря их физическим свойствам.

Из большого числа цветных металлов и их сплавов важнейшими являются алюминий, магний, титан, медь и их сплавы. Изучим эти металлы более подробно.

Алюминий – один из наиболее распространенных элементов в природе. Его содержание в земной коре составляет 8,8 %. Чистый алюминий – это легкий металл серебристо-белого цвета, его температура плавления составляет 660 °С. Плотность алюминия $2,7 \cdot 10^3$ кг/м³. Он обладает уникальными характеристиками электро- и теплопроводности, уступая только серебру и меди.

В нормальном состоянии металл покрыт пленкой окиси Al_2O_3 , которая предохраняет металл от атмосферной коррозии. В отожженном состоянии прочность и твердость алюминия невелика ($\sigma_B = 78 - 98$ МПа, твердость по Бринеллю 196 МПа). Прочность алюминия можно существенно повысить путем наклепа, но при этом практически исчезнут его пластические свойства.

Алюминий хорошо обрабатывается давлением и резанием. Наибольшее применение он нашел в электротехнической промышленности как проводниковый материал. Алюминий используют как раскислитель при производстве стали, для нанесения защитных покрытий на другие металлы и т.п.

Большая часть выплавляемого алюминия используется в виде сплавов, которые подразделяются на деформируемые и литейные. Среди деформируемых сплавов наибольшее распространение получили сплавы Al-Cu-Mg – так называемые дуралюмины. Эти сплавы способны упрочняться при термической обработке, они обладают хорошим соотношением прочность – пластичность, что в сочетании с небольшой плотностью, обеспечило им широкое применение. Они используются для изготовления лопастей воздушных винтов, узлов крепления строительных конструкций, силовых элементов конструкций самолетов, кузовов автомобилей, буровых труб и т.п.

К деформируемым сплавам относятся также высокопрочные сплавы алюминия. В основе этих сплавов лежит система Al-Zn-Mg-Cu. Эти сплавы получили широкое распространение в промышленности, из них изготавливают прутки, профили, листы, трубы и другие полуфабрикаты и изделия.

Из литейных сплавов наибольшее распространение получили так называемые силумины – сплавы алюминия с кремнием, содержание кремния 5 – 14 %. Силумины имеют хорошие литейные свойства, обрабатываемость резанием, свариваемость, а также устойчивость к коррозии. Силумины применяются в тех случаях, когда необходима небольшая масса изделия в сочетании с высокой прочностью. Прочность силуминов можно повысить введением небольшого количества легирующих элементов (меди, магния, марганца и др.). Легированные силумины называются специальными.

В соответствии с международной конвенцией по защите человеческой жизни на море негорючим является материал, который при нагреве до $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ не горит и не выделяет горючих газов. Алюминиевые сплавы удовлетворяют этим требованиям и поэтому допущены к использованию в судостроении и морских шельфовых сооружениях. Однако используя их, необходимо соблюдать требования по обеспечению огнестойкости алюминиевых корпусных конструкций. При высоких температурах происходит разупрочнение и плавление конструкций из алюминиевых сплавов. Для сохранения не менее 80% механических свойств следует защищать алюминиевые конструкции. Применяемые в морской практике конструкции из этих материалов (алюминиевый сплав + защитное покрытие) проходят специальные испытания на огнестойкость. В ходе этих испытаний проверяется способность конструкции предотвращать проникновение через них дыма и пламени в течение стандартного промежутка времени без разрушения: А-60 – 60 мин; А-30 – 30 мин; А-15 – 15 мин .

Магний – легкий металл серебристо-белого цвета, имеющий температуру плавления $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и меньшую, чем у алюминия плотность $1,76 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$. В земной коре его содержится 2,1 %. Магний в чистом состоянии имеет очень низкие прочность и пластичность ($\sigma_B = 29\text{ МПа}$, $\delta = 2\%$). У магния так же как и у алюминия на поверхности имеется защитная пленка окислов, которая повышает его коррозионную стойкость. Однако эта пленка менее прочная и легко разрушается. Чистый магний имеет ограниченное применение в пиротехнике и военном деле, в качестве легирующей добавки при выплавке металлов и сплавов.

Сплавы магния также подразделяются на деформируемые и литейные. Особый интерес представляют изготавливаемые на основе магния сверхлегкие сплавы. Плотность этих сплавов составляет всего $1350 - 1600\text{ кг/м}^3$. В табл. 3.6 приведен состав и основные механические свойства этих сплавов.

Титан – металл серебристо-белого цвета, имеющий температуру плавления $1725\text{ }^{\circ}\text{C}$ и плотность $4,5 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$. В составе земной коры находится 0,6 % титана. По распространенности в мире он занимает четвертое место, уступая только железу, алюминию и магнию.

Таблица 3.5

Основные механические свойства чугунов

Чугун	Растяжение		Сжатие				Срез		Изгиб	
	$E \cdot 10^{-3}$, МПа	δ , %	σ_c , МПа	$E \cdot 10^{-3}$, МПа	μ	ψ , %	τ_B , МПа	$G \cdot 10^{-3}$, МПа		c_{H1} , кДж/м ³
Серый	60 – 145	0,2 – 1,0	500 – 1200	65 – 155	0,28 – 0,29	15 – 40	150 – 400	40 – 64	40 – 100	240 – 540
Высокопрочный ферритный	165 – 175	–	1000 – 1400	–	0,28 – 0,29	12 – 20	320 – 400	65 – 75	150 – 200	750 – 900
Высокопрочный перлитный	175 – 185	–	1500 – 2000	–	0,28 – 0,29	4 – 8	400 – 550	75 – 80	80 – 200	850 – 1200
Ковкий	155 – 170	–	90 – 120	–	0,23 – 0,29	10 – 18	270 – 300	63 – 70	120 – 160	310 – 350

Таблица 3.6

Состав и механические свойства сверхлегких сплавов на основе магния

Сплав	Химический состав, %						HV	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	Li	Al	Zn	Mn	др. эл-ты	МПа					
MA18	10 – 11,5	0,5 – 1	2 – 2,5	0,1 – 0,4	0,15 – 0,35	600	185	150	30,5	60	
MA21	7 – 10	4 – 6	0,8 – 2	0,1 – 0,5	3 – 5	750	240	190	18,5	26	

Чистый титан отличается высокими механическими свойствами, небольшой плотностью и поэтому высокой удельной прочностью при комнатной и криогенных температурах. Он обладает хорошей коррозионной стойкостью. Чистый титан имеет ограниченное применение в промышленности.

Значительный интерес представляют сплавы титана. Титан образует двух- и многокомпонентные сплавы с другими элементами, основным из которых является алюминий. По технологии изготовления титановые сплавы подразделяются на деформируемые, литейные и порошковые, по механическим свойствам – на сплавы нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные, повышенной пластичности. Титановые сплавы применяются в авиационной и ракетостроении – каркасные детали, обшивка, топливные баки, детали реактивных двигателей и т.п.; в судостроении – обшивка корпуса судов и подводных лодок, сварные трубы, гребные винты; в химической промышленности, криогенной технике, газовой и нефтяной промышленности.

Медь – металл красноватого цвета с температурой плавления 1083 °С и плотностью $8,93 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. В природе медь мало распространена, ее содержание в земной коре составляет всего 0,01 %. Медь обладает высокой электро- и теплопроводностью, уступая по этим показателям только серебру. Прочность меди в отожженном состоянии невелика, а пластичность высокая ($\sigma_B = 215 \text{ МПа}$, $\delta = 50\%$). Медь обладает хорошей коррозионной стойкостью, так как на ее поверхности образуется защитная пленка $\text{CuSO}_4 \times 3\text{Cu}(\text{OH})_2$. Медь хорошо обрабатывается давлением в горячем и холодном состояниях и резанием. Однако ее применение в промышленности ограничено из-за дефицитности и высокой стоимости. Медь в основном используется в электротехнической промышленности как проводниковый материал, а также в химическом машиностроении, где используется ее хорошая коррозионная стойкость. Более 50 % добываемой меди используется для получения различных сплавов. Наибольшее распространение в технике получили сплавы на основе меди, которые называются *латунями* и *бронзами*.

Латунями называют сплавы меди с цинком. Обычно в технике применяют латуни с содержанием цинка, не превышающем 45 %,

так как при большем количестве цинка резко снижаются прочностные и особенно пластические свойства сплава. Зависимость временного сопротивления и относительного удлинения после разрыва латуней от содержания цинка показана на рис. 3.3.

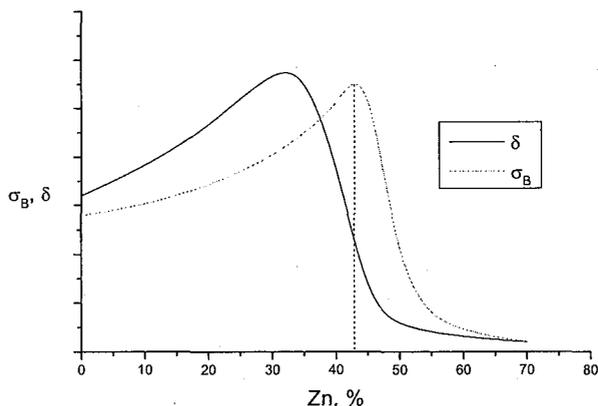


Рис. 3.3. Зависимость механических свойств латуни от содержания цинка.

По технологическим признакам латуни подразделяются на деформационные (обрабатываемые давлением) и литейные. Из деформационных латуней изготавливают различные изделия и полуфабрикаты, предназначенные для дальнейшей обработки.

В технике применяются также многокомпонентные латуни, легированные различными элементами. Эти добавки могут существенно повышать прочность, твердость, упругость, коррозионную стойкость, антифрикционные свойства и технологические характеристики. В зависимости от состава дополнительных элементов латуни, содержащую Al, называют алюминиевой; Fe и Mn — железомарганцевой; Mn, Sn, Pb — марганцево-оловянно-свинцовой и т.д. Алюминиевые латуни обладают повышенными механическими свойствами и коррозионной стойкостью. Марганцевые латуни характеризуются хорошими механическими свойствами, коррозионной стойкостью, а также высокой технологичностью. Их можно обрабатывать давлением в горячем и холодном состояниях. Свинцовые латуни обрабатываются резанием и обладают хорошими антифрикционными свойствами.

Бронзами называют сплавы меди с оловом, алюминием, кремнием, свинцом, бериллием, кадмием и другими элементами, кроме цинка. По добавленным в медь элементам бронзы подразделяются на оловянные, которые являются одним из наиболее известных человечеству сплавом, и не содержащие олово в качестве легирующего элемента. По технологическому признаку бронзы делятся на литейные и деформируемые. Литейные бронзы предназначены для производства фасонных отливок. Деформируемые хорошо поддаются обработке давлением. По сравнению с латунями бронзы обладают более высокими механическими, коррозионными и антифрикционными свойствами. Бронзы называют по названию важнейшего из легирующих элементов.

На практике используются оловянные бронзы с содержанием олова не более 20 %, поскольку при увеличении содержания олова растет прочность и твердость бронз, но заметно уменьшается пластичность. Оловянные бронзы для улучшения их свойств могут легировать цинком, свинцом, фосфором. Оловянные бронзы, обрабатываемые давлением, используются для изготовления пружин, деталей машин, подшипников, шестерен, зубчатых колес, а также лент, полос, прутков, применяемых в электротехнике. Имеется разновидность оловянных бронз (БрОФ4-0,25), которая применяется при изготовлении трубок контрольно-измерительных и других приборов и манометрических пружин. Основным достоинством литейных оловянных бронз является их малая усадка при затвердевании, что позволяет изготавливать из них фасонные отливки бронзы.

Среди неоловянных бронз наибольшее распространение получили алюминиевые, кремнистые, свинцовые и бериллиевые бронзы. Алюминиевые бронзы содержат 5 – 10 % Al. Они по механическим и коррозионным свойствам превосходят оловянные. Кроме этого, стоимость их производства ниже, чем у оловянных. Для повышения механических свойств алюминиевые бронзы подвергаются закалке при 800 °С, с последующим охлаждением в воде и отпуском. Из этих бронз мелкие детали ответственного назначения – фланцы, втулки, зубчатые колеса и т.п. Кремневые бронзы также обладают более высокими механическими и коррозионными свойствами, чем оловянные. Высокие антифрикционные свойства

имеют свинцовистые бронзы (содержание свинца до 30 %), они хорошо обрабатываются резанием. Бериллиевые бронзы после упрочняющей термообработки имеют высокие механические свойства: прочность, твердость, упругость и выносливость. Их используют в приборостроении для изготовления мембран, пружин и других изделий. Основным недостатком является высокая стоимость бериллия.

3.3. Композитные материалы

По своей структуре *композитные материалы* являются гетерогенными (неоднородными). Они состоят не менее чем из двух фаз-компонентов, при этом каждый компонент сохраняет свои свойства. В композитных материалах состав и форма компонентов определены заранее, их количество обеспечивает получение заданных свойств материала. На макроуровне структура композитного материала однородна, на микроуровне существует значительная неоднородность, между компонентами существует явная граница раздела.

Компонент, непрерывный по всему объему материала, называется *матрицей*. Другие компоненты, разделенные в объеме композиции, являются *армирующими*. Одним из основных требований к матрице и армирующим элементам является их химическая нейтральность, т.е. компоненты не должны вступать между собой в реакции и образовывать твердые растворы. В качестве материала матрицы используются металлы и их сплавы, терморезистивные и термопластичные полимеры, керамика и другие материалы. Армирующие компоненты – это мелкодисперсные порошки, получаемые методами порошковой металлургии, или волокнистые материалы любой природы. Они делятся на две основные группы: *дисперсно-упрочненные* и *волокнистые*.

При дисперсно-упрочненном армировании мелкодисперсные частицы равномерно распределены по объему матрицы. Упрочнение материала происходит за счет создания барьеров для перемещения *дислокаций* (дефектов кристаллической решетки матрицы, имеющих малые размеры в двух направлениях и большую протяженность в третьем). Наиболее эффективно тормозят дислокации

частицы химических соединений – карбидов, нитридов, боридов, оксидов. Они обладают высокими значениями твердости, прочности, а также химической устойчивостью. Промышленность выпускает дисперсно-упрочненные композиты с алюминиевой, магниевой, титановой, никелевой, вольфрамовой и другими матрицами. Представление о прочности таких композитов дает табл. 3.7.

Таблица 3.7

**Предел прочности дисперсно-упрочненных композитов
на основе никеля и кобальта**

Состав	Предел прочности, МПа		
	20 °С	600 °С	1100 °С
98 % Ni, 2% ThO (ВДУ – 1)	550	290	150
98 % Ni, 2% ThO (ВДУ – 2)	470	220	100
78% Ni, 20% Cr, 2% ThO	820	490	100
98 % Co, 2% ThO	960	170	85
97,8 % Co, 2% ThO, 0,2% Zn	1020	300	140

Наибольшее распространение получили волокнистые композиты. При их изготовлении пластичная матрица армируется высокопрочными волокнами, которые воспринимают нагрузку и обеспечивают упрочнение композитов. Свойства таких композитов определяются природой материалов матрицы и волокна, а также способами армирования. Поэтому композит может приобретать ряд свойств, которыми не обладают его компоненты. Классификация волокнистых композитов по конструкционным признакам представлена на рис. 3.4.

По материалу матрицы композиты подразделяются на пластики (полимерная матрица), металлокомпозиты (металлическая матрица), композиты с керамической и углеродной матрицей. Матрица должна обеспечивать монолитность композита, равномерность нагрузки на волокна и ее перераспределение при разрушении части волокон. При изготовлении композита необходимо обеспечить равномерность распределения волокон по матрице и прочность связи на границе раздела матрица-волокно.

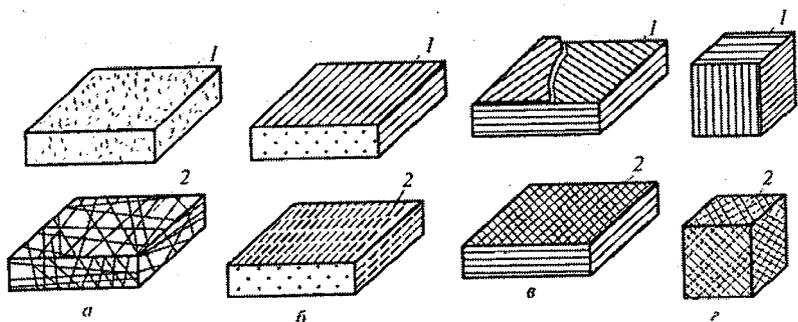


Рис. 3.4. Классификация композитов по конструктивным признакам:
а – хаотическое армирование (1 – короткие волокна; 2 – непрерывные волокна);
б – одномерно-армированные (2 – короткие волокна; 1 – непрерывные волокна);
в – двухмерно-армированные (1 – непрерывные нити; 2 – ткани); *г* – пространственно-армированные (1 – три семейства нитей; 2 – *n* семейств нитей).

В производстве полимерных матриц используются термореактивные эпоксидные и полиэфирные смолы. Основными недостатками материалов с такими матрицами являются их низкие жесткость, прочность и теплостойкость. В табл. 3.8 приводятся основные свойства полимерных матриц.

Таблица 3.8

Свойства полимерных матриц

Матрица	Усадка изделия, %	Теплостойкость, °С	α , кДж/м ²	σ_B , МПа	E , МПа
Эпоксидная	1,1	160	7	80	3,2
Феноформальдегидная	1,6	180	4	45	4,0
Кремнийорганическая	2,5	280	3	30	4,5
Полиэфирная	5,8	70	8	45	2,3
Полиамидная	–	100	100	75	–
Поликарбонаты	–	140	200	70	–

Углеродистые матрицы имеют высокие механические характеристики и теплостойкость (свыше 2000 °С), а также низкий коэффициент трения и температурного расширения. Они обладают высокой химической стойкостью.

Для металлических матриц применяют сплавы алюминия, магния и титана.

В качестве армирующих материалов используются волокна из стекла, бора, углерода, металлическая проволока, нитевидные кристаллы оксидов, нитридов и т.п. Основные свойства армирующих волокон приведены в табл. 3.9.

Название композита является производным от названий матрицы и армирующего материала. Например, стеклопластик – это композит с матрицей из пластмассы, армированной стекловолокном.

Таблица 3.9

Свойства волокон и нитевидных монокристаллов

Материал	Температура плавления, °С	Диаметр волокна, мкм	Плотность, г/см ³	σ_B , МПа	E , ГПа
Волокна					
Углерод	3650	5,8 – 7,6	1,6 – 2	1700 – 3400	220 – 680
Бор, борсик (В+SiC) на вольфрамовой проволоке	2300	102 – 142	2,6 – 2,8	2700 – 4000	380 – 410
SiC на вольфрамовой проволоке	2200	102	3,35 – 3,46	2200 – 3900	490 – 570
Al ₂ O ₃	2040	3	3,14	2030	169
Стекло	–	20	2,5	4482	90
Бериллий	1284	125 – 1500	1,85	700 – 1000	295
Вольфрам	3410	50 – 1270	19,3	1600 – 3200	420
Нержавеющая сталь	свыше 1500	150	7,8	3800	200
Нитевидные монокристаллы					
Сапфир, Al ₂ O ₃	2040	0,5 – 11	3,96	4000 – 24 000	400 – 1000
Карбид кремния	2690	0,5 – 11	3,22	13533 – 40 600	40 – 1000

Прочность композитного материала зависит от механических свойств матрицы и волокна, а также их объемного соотношения. Если объемная доля волокон мала, то прочность композита может быть меньше прочности матрицы, так как волокна быстро нагружаются до своего предельного значения и разрушаются. Если же объемная доля волокон превышает 80 %, то механические свойства композита снижаются из-за того, что матрица не в состоянии смочить и пропитать каждое волокно, возникает проскальзывание волокон. Между этими двумя крайними положениями прочность композита описывается уравнением

$$\sigma_{\text{КОМ}} = \sigma_{\text{В}} V_{\text{В}} + \sigma_{\text{М}} V_{\text{М}},$$

где $\sigma_{\text{КОМ}}$, $\sigma_{\text{В}}$, $\sigma_{\text{М}}$ – прочность композита, волокна и матрицы соответственно; $V_{\text{В}}$, $V_{\text{М}}$ – объемная доля волокна и матрицы. Зависимость прочности волокнистого композита от объемной доли волокна представлена на рис. 3.5.

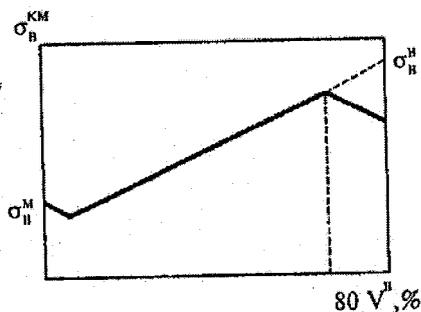


Рис. 3.5. Прочность композитного материала в зависимости от объемной доли волокна.

Образование трещин при разрушении композитных волокнистых материалов имеет определенные особенности. Они связаны с тем, что сопротивление распространению трещины вдоль волокна значительно ниже, чем в поперечном направлении. В первом случае разрушается материал матрицы, а во втором матрицы и волокон. На рис. 3.6 показаны возможные типы разрушения композитов.

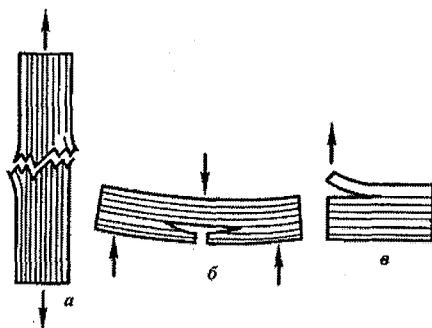


Рис. 3.6. Типы разрушения слоистых композитов:
 а – щеткообразное; б – продольное растрескивание;
 в – межслойное растрескивание.

3.4. Неметаллические материалы

К неметаллическим материалам, используемым в морских технологиях, относятся пластмассы, эластомеры и резины, пленкообразующие материалы, неорганические и органические стекла, древесина и т.п. Ниже будут кратко рассмотрены основные свойства этих материалов.

Пластическими массами (пластмассами) называют искусственные материалы, основой для которых являются полимеры – высокомолекулярные вещества с очень большой молекулярной массой. По своей химической структуре макромолекула полимера состоит из многократно повторяющихся звеньев – мономеров. Макромолекула полимера может быть линейной, разветвленной и пространственной. Мономеры связываются в макромолекуле сильной ковалентной связью. Связь между отдельными макромолекулами обусловлена силами Ван-дер-Ваальса и является более слабой. Такие полимеры – *термопласты* – легко переходят в пластичное состояние при повышении температуры и вновь застывают при понижении. Существует группа полимеров, называемых *терморезактивными*, в которых благодаря специальной обработке создаются устойчивые химические связи между макромолекулами. Такие полимеры при нагреве практически не изменяют своих свойств вплоть до температуры деструкции. В зависимости от ос-

новы, из которой изготавливаются пластмассы, они также подразделяются на *термопластичные* и *термореактивные*.

Пластмассы могут быть одно- и многокомпонентными. В состав однокомпонентных пластмасс входит один полимер. В многокомпонентные пластмассы-наполнители, пластификаторы, отвердители и красители.

Наполнители используются для придания пластмассам необходимых механических свойств. Для этого используются инертные к полимеру органические и неорганические вещества. Наполнители могут быть порошковые (древесная мука, графит, тальк и т.п.), волокнистые (очесы хлопка и льна, стекло-асболокниты), слоистые (бумага, хлопчатобумажная ткань, стеклоткань, асбест), газонаполненные (воздух, инертные газы).

Пластификаторы используются для повышения пластичности, морозо- и огнестойкости. В качестве пластификаторов используют олеиновую кислоту и стеарин.

Отвердители способствуют отверждению термореактивных пластмасс. Красители и пигменты используются для придания пластмассам определенной окраски.

В табл. 3.10 приведены основные свойства термопластичных и термореактивных пластмасс.

Таблица 3.10

Основные свойства термопластичных и термореактивных пластмасс

Полимер	Плотность, кг/м ³	Рабочая температура, °С	Прочность, МПа	δ, %	E, МПа
1	2	3	4	5	6
Термопласты					
ПЭВД	920 – 930	-130 ... 110	10 – 17	500 – 800	15 – 25
ПЭНД	955	-160 ... 100	18 – 45	500 – 1200	70
Полипропилен	920 – 930	-20 ... 150	30 – 35	200 – 800	70 – 80
Полистирол	1050	-20 ... 90	35 – 50	1.2 – 2	30
Фторопласт-4	2200	-270 ... 250	15 – 35	250 – 500	50 – 90
Фторопласт-3	2140	-190 ... 160	30 – 40	20 – 200	120 – 140

Окончание табл. 3.10

1	2	3	4	5	6
Поливинилхлорид (ПВХ)	1370	-50 ... 60	45 - 70	5 - 100	80 - 120
Полиэтилен терефталат	1330 - 1450	-60 ... 70	150 - 280	60 - 180	350 - 450
Полиуретаны	-	-400 ... 60	25 - 55	400 - 700	-
Терморезактивные пластмассы					
Порошковые	1400	110	50 - 100	0.5	до 8000
Волокнистые					
Волокнит	1400	110	30 - 60	2	8500
Асболокнит	1950	200	-	3	18 000
Стекловолокнит	1800	280	80 - 500	2	-
Слоистые					
Гетинакс	1350	150	80 - 100	2	1000
Текстолит	1400	125	65 - 100	2	до 1000
Асботекстолит	1600	190	55	-	2000
ДСП	1350	200	180 - 300	-	до 3000
Стеклотекстолит	1750	300	250 - 600	-	до 3000
СВАМ	1900	200	350 - 1000	-	3500

Эластомеры относятся к классу полимеров. Эти материалы обладают очень важными для многих приложений свойствами, они имеют очень высокую упругую деформацию и малый модуль упругости. Относительная упругая деформация эластомера на три порядка превышает этот показатель для большинства полимеров и на четыре порядка для металлических материалов. Уникальные свойства эластомеров объясняются особенностями строения его макромолекул. В ненагруженном состоянии макромолекул содержат большое количество изгибов, витков и петель, которые при приложении нагрузки вытягиваются.

На рис. 3.7 приведена кривая растяжения эластомера, из которой следует, что эти материалы не подчиняются закону Гука, они имеют нелинейную связь между напряжением и деформацией.

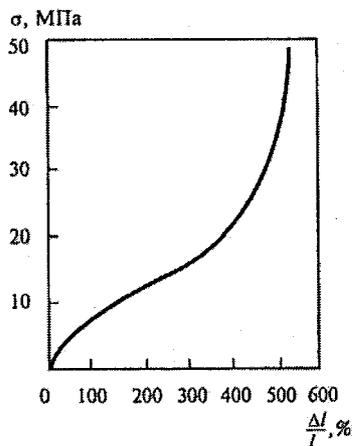


Рис. 3.7. Кривая растяжения эластомера.

Эластомеры бывают естественные, их получают из сока растений (гевея бразильская, кок-сагыза, тау-сагыза), или искусственные.

Наибольшее распространение получили *резины* – продукт химической переработки (вулканизации) каучуков. Технология вулканизации заключается в нагреве каучука в парах серы, при этом линейная структура каучука превращается в пространственную. В процессе химической реакции, происходящей при вулканизации, атомы серы соединяют макромолекулы каучука. Свойства резины зависят от количества введенной в каучук серы. При 5 % ее содержании получается мягкая резина, а уже при 30 % содержании получается твердое вещество – эбонит.

К пленкообразующим относят материалы, образующие после нанесения на поверхность связанные с этой поверхностью пленки. Эти материалы подразделяются на клеи, предназначенные для соединения различных поверхностей; герметики, служащие для герметизации (непроницаемости) поверхностей; лакокрасочные покрытия, применяемые для защиты поверхностей от вредных воздействий, а также для создания декоративных покрытий. Компонентами пленкообразующих материалов являются: собственно пленкообразующие вещества; растворители, определяющие вяз-

кость материала; наполнители, уменьшающие усадку пленки; пластификаторы, отвердители и катализаторы.

При создании образцов морской техники используются различные изделия из стекла. Аморфная структура стекла является промежуточной между кристаллическим веществом и жидкостью. Стеклообразующими веществами являются оксиды кремния, бора и фосфора. Особенностью структуры определяются ряд важных для приложений свойств стекла. Это в первую очередь прозрачность и высокая прочность. К недостаткам стекла относится его хрупкость. Внесением в стекло различных добавок можно добиться целенаправленного изменения его свойств.

Для устранения важнейшего недостатка стекла – хрупкости, был разработан термопластичный полимер на основе полиметилметакрилата и других акриловых полимеров – органическое стекло. Этот материал светопрозрачен, имеет относительно небольшую плотность (1180 кг/м^3) и малую хрупкость. Кроме этого он обладает высокой химической стойкостью в воде, спиртах, разбавленных кислотах и щелочах.

3.5. Наноматериалы

В последние годы появились новые возможности улучшения свойств конструкционных материалов. В первую очередь это связано с разработкой методов целенаправленного формирования микро- и нанокристаллической структуры материалов. Такие материалы получили название *наноматериалов*.

Наноматериалы можно классифицировать по химическому составу, форме кристаллитов и расположению границ раздела (табл. 3.11).

Формирование нанокристаллических структур позволяет получать конструкционные материалы с уникальными качествами. Так, микротвердость наноматериалов в 2 – 7 раз выше, чем твердость крупнозернистых аналогов. На рис. 3.8 представлено соотношение между прочностью и пластичностью обычных сталей и стали с нанокристаллической структурой. Из данных, приведенных на рисунке, следует, что сталь с нанокристаллической структурой обладает прочностью, сравнимой с высокопрочными сталями, а ее пластичность соответствует углеродистым сталям.

Классификация наноматериалов

Форма кристаллитов	Химический состав кристаллитов			
	Состав кристаллитов и границ раздела одинаковый	Состав кристаллитов различен	Состав границ и кристаллитов различен	Кристаллиты диспергированы в матрице различного состава
Слоистая				
Волокнистая				
Равноосная				



Рис. 3.8. Соотношение между прочностью и пластичностью сталей.

При переходе к наноструктурам существенно повышается износостойкость материала. Эксперименты показывают, что при уменьшении размера зерна от 10 мкм до 10 нм скорость износа никеля в одних и тех же условиях уменьшилась более чем 150 раз.

Конструкционные материалы с наноструктурами открывают уникальные возможности для получения нового уровня свойств: высокой прочности, твердости, износостойкости при достаточно высокой пластичности. В настоящее время ведутся разработки методов получения массивных нанокристаллических заготовок с равномерным распределением структуры по сечению заготовки.

4. Морская коррозия

4.1. Основные виды коррозии

Коррозией называется разрушение металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой, происходящее на поверхности раздела фаз. Коррозия является одной из самых разрушительных сил в природе. Примерно 10 % получаемого ежегодно в мире железа идет на восполнение безвозвратных потерь, связанных с коррозией.

Фундаментальной причиной коррозии является термодинамическая неустойчивость металла в данных условиях. Очевидно, что на процесс коррозии оказывают влияние как свойства металла, так и свойства коррозионной среды. В теории коррозии показывается коррозионная устойчивость металла, которая определяется величиной и знаком электронного потенциала ϕ .

По своей природе коррозионные процессы могут быть разбиты на три группы: химические, электрохимические и биологические.

Химическая коррозия происходит в тех случаях, когда электрический ток в среде не возникает. При взаимодействии с коррозионной средой окисление металла Me и восстановление окислительной компоненты среды D протекает в одном акте:



Электрохимическая коррозия. Как следует из названия процесса, при электрохимической коррозии в среде возникает электрический ток. Ионизация атомов металла и восстановление окислительной компоненты среды протекают не в одном акте – их скорости зависят от электродного потенциала. В среде происходит не

менее двух сопряженных реакций, в которых принимают участие свободные электроны:

– реакция окисления металла $Me \rightarrow Me^{n+} + ne^{-}$;

– реакция восстановления окислителя $D + ne^{-} \rightarrow R$, здесь R – восстановленная форма окислителя.

Биохимическая коррозия металлов происходит под воздействием агрессивных продуктов жизнедеятельности различных макро- и микроорганизмов.

Коррозию классифицируют по особенностям протекания процессов на поверхности металла и сред, а также по характеру коррозионных разрушений.

В зависимости от особенностей процессов коррозии выделяют следующие ее виды:

– газовая коррозия, происходящая в газах и при высоких температурах. Этот тип коррозии обычно наблюдается внутри технических устройств, например двигателей;

– атмосферная коррозия – разрушение металлов на воздухе;

– при полном и неполном погружении в коррозионную среду;

– подземная коррозия;

– коррозия, возникающая под воздействием блуждающих токов;

– структурная коррозия, обусловленная наличием примесей в металле;

– коррозия, возникающая при контакте металлов, имеющих разные электродные потенциалы в данной коррозионной среде;

– усиление коррозионных процессов, происходящее в щелях и зазорах между металлами;

– коррозия, возникающая в коррозионной среде при наличии в металле механических напряжений;

– коррозионная кавитация – одновременное воздействие на металл коррозионной среды и ударного воздействия внешней среды;

– коррозионная эрозия, обусловленная одновременным действием коррозионной среды и трения;

– фреттинг-коррозия – разрушение металла при колебательных движениях двух поверхностей относительно друг друга.

Виды коррозии, различающиеся по характеру коррозионных разрушений, представлены на рис. 4.1.

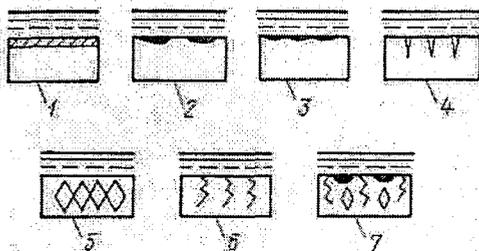


Рис. 4.1. Виды коррозии: 1 – равномерная, 2 – пятнами, 3 – точечная (питтинг), 4 – язвенная, 5 – межкристаллитная, 6 – растрескивающая, 7 – сплошная.

Химическая коррозия, протекающая в газах при высоких температурах а также в растворах неэлектролитов, не столь существенна при изучении Мирового океана, как другие типы коррозии. Способность металлов сопротивляться химической коррозии при высоких температурах называется *жаростойкостью*, а способность сохранять при этом хорошие механические свойства называется *жаропрочностью*.

Наибольшее влияние на работоспособность средств освоения и исследования Мирового океана оказывают процессы биохимической и электрохимической коррозии.

Биокоррозия вызывается продуктами жизнедеятельности различных микро- и макроорганизмов, которые принимают активное участие в окислительных процессах. В наибольшей степени на коррозионные процессы, происходящие в почве, воде и нефти, влияние оказывают бактерии. Вызванная бактериями коррозия бывает аэробной, т.е. происходящей при доступе воздуха, или анаэробной – без доступа воздуха. Во влажной атмосфере может протекать грибная коррозия.

Механизм биологической коррозии до конца еще не понят, тем не менее, в ней можно выделить три различных процесса:

1. Непосредственное влияние микроорганизмов на изменение концентрации веществ внешней среды, что приводит к возникновению разности потенциалов, и появление коррозионных токов

между местами расположения колоний микроорганизмов и незаселенными участками металла.

2. Удаление коррозионных продуктов, например, окисленного металла с анодных участков и поглощение водорода на катодных. Все это способствует протеканию процесса электрохимической коррозии.

3. Изменение химической среды на поверхности раздела металл – коррозионная среда, например, изменение показателя pH. Изменение свойств среды, что отражается на ходе коррозионных процессов.

4.2. Анодный и катодный процессы

В морской среде наибольшее распространение имеет электрохимическая коррозия. В настоящее время существует две теории электрохимической коррозии: микрогальванических элементов и сопряженных реакций (кинетическая). Согласно теории микрогальванических элементов коррозионные процессы объясняются работой многоэлектродных короткозамкнутых элементов, при этом происходит растворение анодов. Эта теория хорошо объясняет коррозионные процессы на поверхности металла, содержащего примеси. Однако чистые металлы также корродируют, поэтому такой теорией этот факт плохо объясняется.

Кинетическая теория предполагает, что процессы окисления и восстановления при коррозии могут происходить на одном и том же участке металла. Оба процесса должны протекать сопряжено, чтобы выполнялся закон сохранения заряда.

Рассмотрим подробнее анодный и катодный процессы, протекающие при коррозии. Окисление, происходящее на участках металла с меньшей величиной потенциала, является анодным процессом:



Участки, на которых происходит восстановление окислителя, являются катодами.

Окислителями в процессах коррозии металлов могут выступать кислород, вода и ионы водорода. Так в кислой среде металл окисляет ион водорода (рис. 4.2).

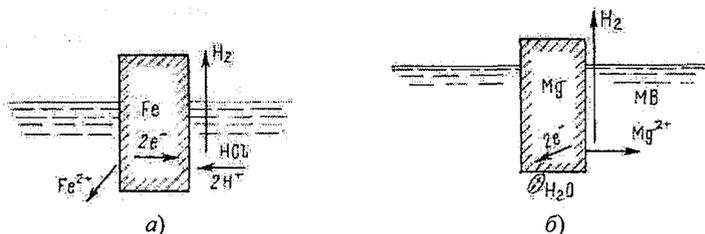
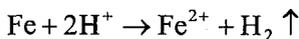
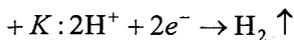
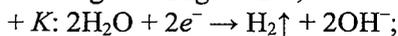
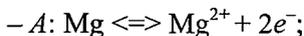


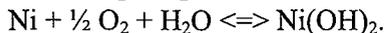
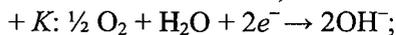
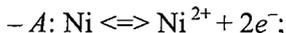
Рис. 4.2. а – окисление железа в кислоте ионом водорода; б – окисление магния в морской воде.



Активные металлы, такие как магний и алюминий, корродируют в морской воде, взаимодействуя с ней.

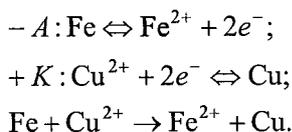


На воздухе и в морской воде большинство металлов и сплавов корродирует под действием кислорода:



Из этих выражений следует, что скорость коррозии будет зависеть от скорости поступления окислителя к поверхности металла и от скорости самой реакции окисления.

Практический интерес представляет рассмотрение влияния ионного состава и pH электролита на процесс коррозии металла. Опытами установлено, что процесс коррозии становится более интенсивным при увеличении электропроводности электролита и при увеличении его концентрации. Катионы активных металлов, таких как натрий, калий, кальций, магний и др., не оказывают влияния на процесс коррозии. Катионы же неактивных металлов серебра, золота, меди и др., являются окислителями и заметно увеличивают интенсивность коррозии:



Особенно активными стимуляторами коррозии являются анионы фтора, хлора и брома. Часть анионов (NO_2^- , NO_3^- , MnO_4^- и др.) способствуют образованию на поверхности металла защитной оксидной или солевой пленки. Поверхность, защищенная такими пленками, становится пассивной.

Зависимость скорости коррозии от величины показателя pH представлена на рис. 4.3. Отсюда следует, что разные металлы по-разному реагируют на показатель pH. У некоторых металлов наблюдается экстремальная зависимость, другие же металлы уменьшают скорость коррозии с ростом pH.

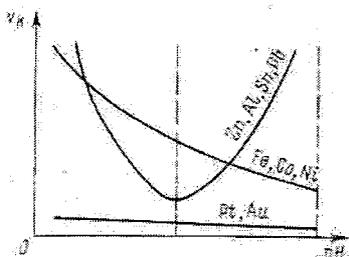


Рис. 4.3. Зависимость скорости коррозии металла от pH электролита.

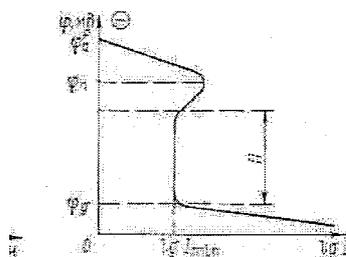


Рис. 4.4. Пассивное состояние анодных участков металла.
П — область пассивации.

Если металл устойчив к коррозии, то изменение его потенциала в определенных пределах не приводит к изменению величины тока коррозии. Это явление пассивации проиллюстрировано на рис. 4.4.

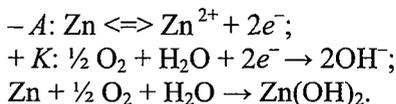
На коррозию влияют еще такие факторы, как температура и скорость течения. С точки зрения термодинамики, увеличение температуры должно приводить к увеличению скорости химических реакций. Однако изменение температуры влияет и на другие параметры морской среды, например, растворимость кислорода при повышении температуры уменьшается. Поэтому влияние на кор-

розию неоднозначно и рассматривать его нужно с учетом других факторов. Для большинства металлов, таких как железо, медь и их сплавы, наблюдается сильная сезонная зависимость коррозии. Она заметно увеличивается в теплые месяцы.

Коррозия многих металлов существенно зависит от скорости обтекания водой их поверхности. Для железа и меди существует критическая скорость обтекания, при превышении которой коррозия резко возрастает. Пассивные же металлы, такие как титан и нержавеющие стали повышают свою коррозионную стойкость при увеличении скорости обтекания.

Рассмотрим различные примеры коррозионных процессов, происходящих в морской воде.

1. *Контактная коррозия, наличие в металле катодных примесей* (рис. 4.5). При смачивании водой, содержащей соли и растворенные газы, контактирующих металлов возникает коррозия. Уравнение реакции можно записать следующим образом:



При контакте цинка с медью цинк является анодом и растворяется (рис. 4.5, а). При наличии же включений в железо инородных металлов цинка и меди (рис. 4.5, б) железо может играть роль как анода, так и катода. Железо является анодом при взаимодействии с медью, а при взаимодействии с цинком железо является катодом.

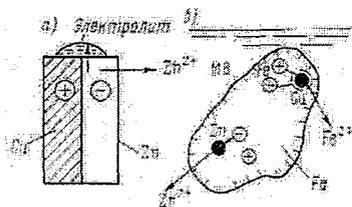


Рис. 4.5. Примеры контактной коррозии (а) и коррозии за счет включения в железо инородных металлов (б).
МВ – морская вода.

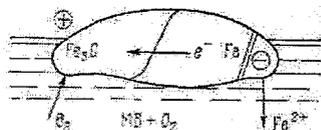
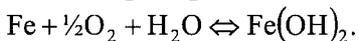
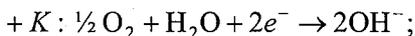
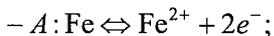
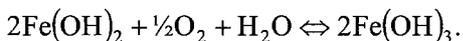


Рис. 4.6. Коррозия при структурной неоднородности металла.

2. *Структурная неоднородность металлов и сплавов* (рис. 4.6). Если в морской воде имеется контакт двух видов углеродистой стали, различающихся содержанием углерода, – цементитной и перлитной (в цементитной стали значительное содержание цементита Fe_3C), то из-за того что потенциал перлитной стали меньше, она является анодом и растворяется.

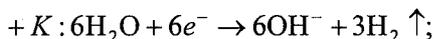
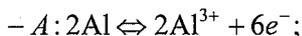


Затем может произойти дальнейшее окисление железа:



3. *Неоднородная обработка металла*. Если различные части металла имеют неодинаковую обработку, то наименее обработанная часть является анодом, а более обработанная катодом.

4. *Механическое нарушение оксидных пленок на поверхности металла*. При нарушении оксидной пленки на поверхности алюминия возникает гальванический элемент. Потенциал алюминия меньше потенциала оксидной пленки.



5. *Влияние внутренних механических напряжений* (рис. 4.7). Участки металла, имеющие более высокий уровень механических напряжений, обладают меньшим потенциалом и, соответственно, являются анодом.

6. *Сварные швы* (рис. 4.8). При сварке протекают два процесса, которые могут привести к возникновению коррозии. Во-первых, сплав, из которого изготовлен электрод, не обязательно совпадает по своему составу со свариваемым металлом или сплавом. Во-вторых, в зоне термических воздействий сварки может выгорать углерод, содержащийся в сплаве, возникать термические напряжения. Потому условием отсутствия коррозии сварных швов

является требование: $\Phi_{шва} \approx \Phi_{Me_1} \approx \Phi_{Me_2}$, где Φ_{Me_1} – потенциал металла, находящегося в зоне термических воздействий; Φ_{Me_2} – потенциал свариваемого металла.

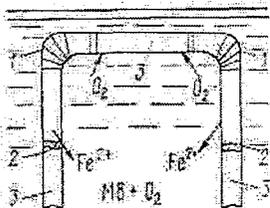


Рис. 4.7. Коррозия напряженных участков металла: 1 – напряженное состояние; 2 – зона разрушения; 3 – зона восстановления окислителя.

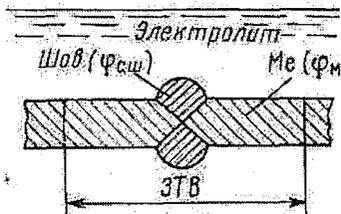


Рис. 4.8. Сварной шов.

7. *Неравномерная аэрация электролита* (рис. 4.9). Если различные участки металла находятся в морской воде с различной концентрацией кислорода, то для них справедливы следующие соотношения:

$$\Phi_{C_1} > \Phi_{C_2} \quad \text{при} \quad C_1(O_2) > C_2(O_2).$$

Другими словами, будет растворяться участок металла, находящийся в морской воде с меньшей концентрацией кислорода.

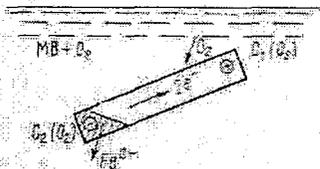


Рис. 4.9. Коррозия при неравномерной аэрации электролита. Зона разрушения заштрихована.

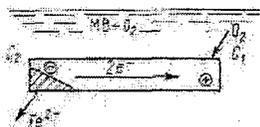


Рис. 4.10. Коррозия металла, погруженного в морскую воду с различной концентрацией солей: $C_1 > C_2$.

8. *Различная концентрация солей в электролите на отдельных участках* (рис. 4.10). Если различные участки металла находятся в электролите с различной концентрацией солей, то для них можно записать:

$$\varphi_{C_1} > \varphi_{C_2} \quad \text{при} \quad C_1 > C_2.$$

Будет растворяться участок металла, находящийся в менее минерализованной морской воде.

4.3. *Океан как коррозионная среда*

Теперь рассмотрим океан как коррозионную среду. Океан можно разбить на ряд зон, в каждой из которых коррозия имеет свои особенности. Классификация этих зон, а также характеристика среды и особенности коррозионного поведения стали в этих средах представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Типичные морские коррозионные среды

Зона	Характеристика среды	Коррозионное поведение стали
1	2	3
Атмосфера (выше зоны брызг)	Ветер приносит мельчайшие частицы морской соли. Коррозия зависит от высоты над водой, скорости и направления ветра, частоты выпадения росы и дождей, температуры, солнечного облучения, времени года, наличия пыли, степени загрязнения воздуха. Даже пятна птичьего помета могут иметь значение.	Укрытые поверхности могут корродировать быстрее, чем полностью открытые все атмосферным воздействиям. Дождь может полностью смывать соль с поверхностей, обращенных кверху. Для стали наиболее опасны смешанные отложения коралловой пыли с морской солью. Обычно скорость коррозии быстро падает с удалением от берега в глубь суши. На расстоянии 2 км воздействие не наблюдается.
Зона брызг	Поверхность металла влажная, хорошо аэрируемая. Обрастания морскими организмами нет	Наиболее агрессивная зона для большинства металлов, в том числе и стали. Сохранность защитных покрытий поддерживать труднее, чем в других зонах.

1	2	3
Зона прилива	Возможно обрастание морскими организмами до отметки полной воды. В гаванях с загрязненной водой на поверхности металла может присутствовать нефтяная пленка. Кислорода обычно достаточно много.	Поверхность стали в зоне прилива может (при хорошей аэрации) служить катодом и получать определенную защиту за счет коррозии участков, расположенных ниже этой зоны (в случае сплошной стальной сваи). Отдельные стальные пластинки корродируют достаточно сильно. Пленка нефтепродуктов на поверхности металла может уменьшать коррозию.
Малые глубины (вблизи поверхности и около берега)	Морская вода обычно насыщена кислородом. Важную роль могут играть загрязнения, отложения, обрастания морскими организмами, скорость движения воды и т.д.	Скорость коррозии может быть выше, чем в морской атмосфере. Известковые отложения образуют катодные участки поверхности. Для борьбы с коррозией необходимо использовать защитные покрытия и/или катодную защиту. В большинстве случаев обрастание морскими организмами, особенно имеющими твердую оболочку, ограничивает приток кислорода к поверхности и уменьшает коррозию.
Глубины континентального шельфа (до 300 м)	Обрастания водорослями нет, обрастание раковинами быстро уменьшается с удалением от берега. Кислорода несколько меньше, чем на мелководье. Понижение температуры.	Скорость коррозии может замедляться по сравнению с хорошо аэрированным поверхностным слоем воды.
Большие глубины	В Тихом океане концентрация кислорода на глубине гораздо меньше, чем у поверхности; в Атлантике эта разница не велика. Температура воды около 0 °С. Скорость движения воды очень мала. Значения рН меньше, чем у поверхности.	Коррозия стали обычно меньше, чем в более высоких слоях воды. Износ растворимых анодов, обеспечивающих катодную защиту, на больших глубинах (порядка 1,5 км) значительно выше, чем в приповерхностных водах. Образование защитных минеральных отложений менее вероятно.

1	2	3
Зона ила	Часто присутствуют бактерии, например, сульфатовосстанавливающие, вырабатывающие сульфиды, разрушающие такие металлы, как сталь и медь. Донные отложения могут иметь различную природу и свойства.	Ил обычно коррозионно активен, лишь изредка инертен. Возможно образование гальванических пар аэрации. Частично погруженные в ил пластинки быстрее разрушаются со стороны ила. Важную роль играют сульфиды. Для катодной поляризации погруженных в ил частей конструкций требуется меньший ток, чем в морской воде.

4.4. Методы защиты от коррозионного воздействия

Рассмотрим, каким образом можно защитить металл от коррозионного воздействия внешней среды. Методы защиты металлов основаны на следующих основных принципах.

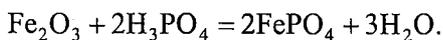
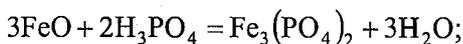
- изоляция металла от вредного воздействия внешней агрессивной среды, которая достигается нанесением лакокрасочных покрытий, наклеиванием пластиков, пассивацией поверхности металла за счет создания оксидных или солевых защитных пленок, покрытие более стойкими металлами (катодные покрытия) и др.;
- катодная электрохимическая защита, осуществляемая катодной поляризацией от внешнего источника тока;
- анодная электрохимическая защита металла, путем контакта с металлом (катодный протектор), имеющим более высокое значение отрицательного потенциала, чем защищаемый металл;
- применение ингибиторов, которые наносятся на поверхность металла или вводятся в среду;
- введение легирующих присадок в углеродистые стали;
- рациональное проектирование конструкций с учетом всех коррозионных факторов.

Рассмотрим эти методы более подробно.

Распространенным методом борьбы с коррозией является защита металла лакокрасочными материалами. Для получения лакокрасочных материалов обычно используют перхлорвиниловые краски, эпоксидные смолы и кремнийорганические эмали. К лакокрасочным материалам предъявляются следующие требования:

- длительный срок защитного действия; средний срок службы таких покрытий 1,5 года;
- хорошая адгезия с металлом;
- высокие механические характеристики;
- незначительные внутренние напряжения;
- пониженная пористость.

В настоящее время перед покраской ржавую поверхность обрабатывают модификаторами ржавчины, основным компонентом которых является ортофосфорная кислота. Обработка модификатором образует на поверхности металла плотный слой окислов и солей фосфатов железа. Этот слой является грунтом, по которому можно проводить покраску. При взаимодействии ржавчины с модификатором протекают следующие реакции:



С помощью специальных химических и электрохимических методов можно создать на поверхности металла плотные оксидные и солевые пленки, препятствующие или существенно замедляющие процесс коррозии. Существует несколько методов нанесения таких пленок:

- оксидирование – формирование пленки Fe_3O_4 на поверхности углеродистых сталей в растворе NaOH , нагретом до $80\text{ }^\circ\text{C}$ (воронение);
- азотирование – процесс насыщения поверхностного слоя металлов азотом при высоких температурах, например, на поверхности железа при температуре $600\text{ }^\circ\text{C}$ образуется пленка нитрида железа Fe_4N ;
- фосфатирование – обработка поверхности железа раствором кислых солей ортофосфорной кислоты при температуре $90\text{ }^\circ\text{C}$;
- карбонизация – создание поверхностного слоя стали, состоящего из цементита Fe_3C и другие процессы.

Одним из перспективных методов защиты металлов от коррозии является покрытие их другими металлами. Существует достаточно много способов нанесения одного металла на другой металл:

- катодное выделение металла в электролизере;
- погружение в расплавленный металл («горячее» лужение, цинкование);
- погружение металла в раствор солей другого металла (выделение меди на железе);
- металлизация – распыление расплавленных легкоплавких металлов (алюминий, цинк, олово) на поверхность другого металла;
- плакирование (диффузионный метод) – сдавливание пластин двух металлов;
- плазменное напыление при высоких температурах (10 000 – 15 000 °С).

Покрытие одного металла другим может создавать либо катодное, либо анодное покрытие. При катодном покрытии защищаемый металл изолируется от агрессивной морской среды. При нарушении покрытия коррозия металла происходит более интенсивно, чем без него. При анодном покрытии, например, цинком происходит разрушение цинка. Покрытие работает до тех пор, пока практически все анодное покрытие не будет разрушено. Процессы коррозии при катодном и анодном покрытиях показаны на рис. 4.11 и 4.12.

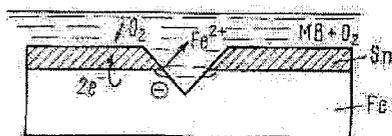


Рис. 4.11. Коррозия при катодном покрытии.

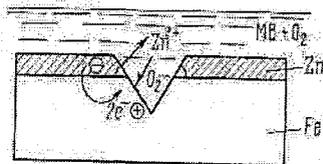


Рис. 4.12. Коррозия при анодном покрытии.

Полное анодное покрытие крупных металлических изделий невозможно, поэтому для их защиты используют анодные протекторы, которые представляют собой пластинки металла, имеющего более высокую отрицательную величину потенциала, чем у конструкции. Примеры применения протекторной защиты показаны на рис. 4.13 и 4.14.

Наряду с анодной протекторной защитой применяется и катодная защита, работающая от внешнего источника тока. С помощью такой защиты конструкция делается катодом, а в агрессивную среду вводится анод. В качестве анода можно использовать металлические пластины. Примеры применения катодной защиты показаны на рис. 4.15 и 4.16.

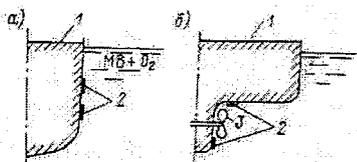


Рис. 4.13. Схемы протекторной защиты бортов судна (а) и гребного винта (б): 1 – судно; 2 – протекторы, 3 – гребной винт.

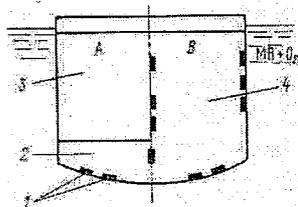


Рис. 4.14. Защита грузовых (А) и балластируемых (В) танков: 1 – протекторы; 2 – подтоварная вода; 3 – нефть; 4 – морская вода.

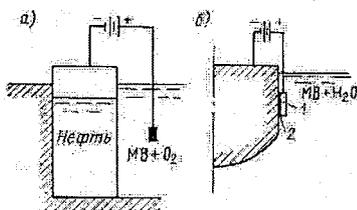


Рис. 4.15. Схемы катодной защиты береговых сооружений (а) и корпуса судна (б): 1 – анод; 2 – изоляция от корпуса судна.

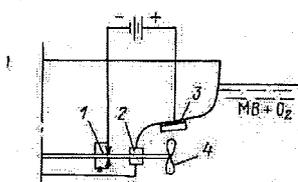


Рис. 4.16. Схема катодной защиты гребного винта: 1 – контактно-сеточное устройство; 2 – диод; 3 – анод; 4 – гребной винт.

Катодная защита имеет ряд преимуществ по сравнению с анодной, главный из которых долгий срок действия.

В настоящее время одним из перспективных методов защиты металлов от коррозии является применение нанотехнологий. Под действием ускоренных заряженных частиц, например, ионов, в металле могут возникать нанофазы, т.е. поверхностные слои металла превращаются в наночастицы. Экспериментально установ-

лено, что такие частицы чрезвычайно устойчивы к окислительным процессам. Это было впервые установлено при изучении образцов лунного грунта, в состав которого входит реголит – продукт переработки коренных лунных пород космическими агентами: солнечным ветром, галактическим излучением, микро- и макрометеоритной и кометной бомбардировкой. В одном из опытов на отполированной до блеска металлической пластине с помощью ионной пушки написали слово «Мир». Затем эту пластину поместили на 10 мин в контейнер с «царской водкой», что эквивалентно 10-летнему пребыванию куска металла на воздухе. После извлечения пластины из контейнера она была полностью проржавевшая, кроме слова «Мир». Этот опыт показывает, что с помощью устройств, создающих на поверхности металла наночастицы, реально продлить срок службы приборов и машин на 5 – 10 лет по сравнению с применяемыми сейчас способами закалки металлов.

5. Электроматериалы

Важную группу составляют материалы, применяемые в приборостроении. Известно, что при изучении Мирового океана применяются различные экспериментальные методы и приборы. Всегда при этом используются электрические способы измерения неэлектрических величин. Поэтому наибольшее распространение в приборостроении получили электротехнические материалы.

Все электротехнические материалы можно разделить на отдельные группы по какому-нибудь их главному свойству. Часто в качестве такого свойства выбирается способность материалов проводить электрический ток. В соответствии с этим свойством материалы делятся на *проводниковые, диэлектрические и полупроводниковые*. Эта классификация позволяет разделить все электротехнические материалы на три большие группы, к которым обычно добавляют четвертую группу – *магнитные материалы*. В эту группу входят материалы позволяющие создавать среды с малым магнитным сопротивлением. Кроме этого, иногда из проводниковых материалов выделяют отдельную группу *сверхпроводников и криопроводников*.

5.1. Проводниковые материалы

К проводниковым материалам относятся металлы и сплавы металлов. Эти материалы имеют кристаллическое строение. Атомы кристаллических материалов располагаются в пространстве в определенном порядке по прямым линиям, образуя кристаллическую решетку. Атомы располагаются в узлах решетки, а также в центре или на гранях элементарного куба. Если в центре элементарного куба расположен один атом, то такая решетка называется *объемноцентрированной* (рис. 5.1). Ее имеют такие электротехнические материалы, как железо, вольфрам, хром, молибден и др. Если же атомы располагаются по граням элементарного куба, то такая решетка называется *гранецентрированной* (рис. 5.2). К материалам относятся медь, алюминий, никель, серебро и др.

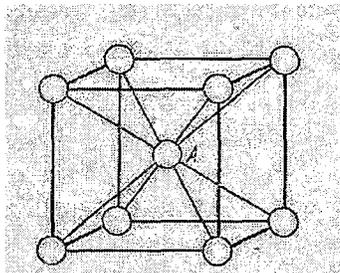


Рис. 5.1. Элементарная кристаллическая ячейка объемноцентрированной решетки.

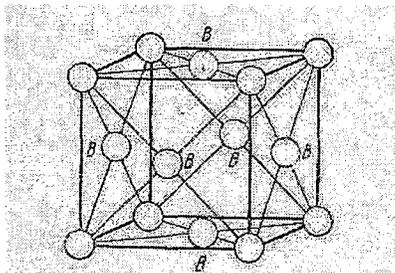


Рис. 5.2. Элементарная кристаллическая ячейка гранецентрированной решетки.

Проводниковые материалы могут быть изготовлены из сплавов разливных металлов. Если сплавляют два металла, то сплав называется двойным, если три – тройным и т.д. При производстве сплавов атомы одного из веществ могут входить в кристаллическую решетку другого вещества. Такие вещества называют *твердыми растворами*. Однако при определенном количественном соотношении между веществами твердый раствор может не образовываться. При этом каждое из веществ кристаллизуется в виде отдельных зерен. В этом случае получают сплав, который является механической смесью исходных металлов.

Твердые растворы различают по тому, как располагаются в кристаллической решетке атомы сплавляемых металлов. Возможны три варианта, которые проиллюстрированы на рис. 5.3.

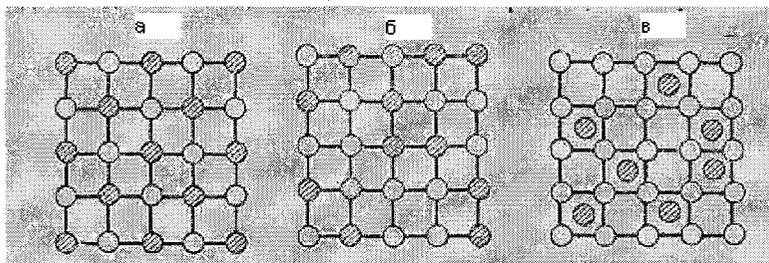


Рис. 5.3. Распределение атомов в решетке твердого раствора:
а – упорядоченного замещения; *б* – неупорядоченного замещения; *в* – внедрения.

При сплавлении двух разных металлов или металла с неметаллом получают новое вещество – сплав, который имеет отличные от исходных веществ механические и физические свойства, а также кристаллическую структуру.

Рассмотрим основные свойства металлов и сплавов, которые определяют их поведение в тепловых, магнитных и электрических полях. В данном разделе нас будут интересовать электрические свойства этих материалов. Проводниковые материалы обладают высокой электропроводностью, которая обуславливается наличием в них большого числа свободных электронов. При наложении на проводник электрического поля электроны начинают дрейфовать в определенном направлении, создавая электрический ток. Экспериментально установлено, что величина электрического сопротивления проводника R (или проводимость G) не изменяется при изменении напряженности внешнего поля. Это утверждение является известным законом Ома:

$$I = \frac{U}{R} = UG,$$

где I – сила тока, А; U – величина приложенного напряжения, В; R – сопротивление проводника, Ом; $G = 1/R$ – проводимость проводника, Ом⁻¹.

Сопротивление проводника изменяется при изменении температуры. Это явление объясняется тем, что при повышении температуры увеличивается амплитуда колебаний ионов, находящихся в узлах кристаллической решетки. Они начинают препятствовать движению электронов. При понижении температуры амплитуда колебаний уменьшается, и сопротивление движению электронов снижается. Для большинства металлов и металлических сплавов в широком диапазоне изменения температуры зависимость электрического сопротивления от температуры является линейной:

$$R_t = R_0 [1 + \alpha_0 (t - t_0)],$$

где R_t – сопротивление проводника при температуре t ; R_0 – сопротивление проводника при некоторой температуре t_0 ; α – температурный коэффициент электрического сопротивления при начальной температуре t_0 . Эта величина показывает, насколько Ом изменится сопротивление проводника при возрастании температуры на 1°C . У проводниковых материалов эта величина мала, так, например, для проводниковой меди она составляет $\alpha = 0,0040 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, а для проводникового алюминия $\alpha = 0,00402 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Количественно электрическое сопротивление материала оценивается с помощью *удельного электрического сопротивления*, которое определяется по формуле

$$\rho = R \frac{S}{l},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление; S – площадь поперечного сечения проводника; l – длина проводника.

Обычно удельное электрическое сопротивление измеряется в Ом·м. Удельное электрическое сопротивление – основная характеристика материала. У проводниковой меди эта величина варьируется в пределах $\rho = 0,0172 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а у проводникового алюминия $\rho = 0,028 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Часто также используют обратную к удельному электрическому сопротивлению величину, называемую *удельной проводимостью*.

стью γ . Она измеряется в $1/\text{Ом} \cdot \text{м}$. Чем выше удельная проводимость, тем лучше материал проводит ток. Так, например, удельная проводимость серебра составляет $\gamma = 62,5 \cdot 10^6$ $1/\text{Ом} \cdot \text{м}$, а меди $\gamma = 58,1 \cdot 10^6$ $1/\text{Ом} \cdot \text{м}$. Серебро проводит ток лучше, чем медь.

Введение удельного электрического сопротивления и удельной проводимости позволило провести исследование различных факторов на эти величины. На рис. 5.4 показано влияние примесей, а на рис. 5.5 – пластической деформации на величину удельной проводимости.

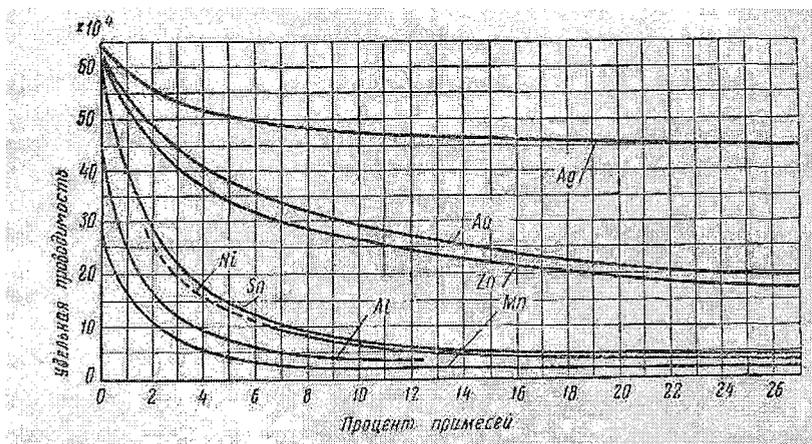


Рис. 5.4. Влияние примесей на удельную проводимость меди.

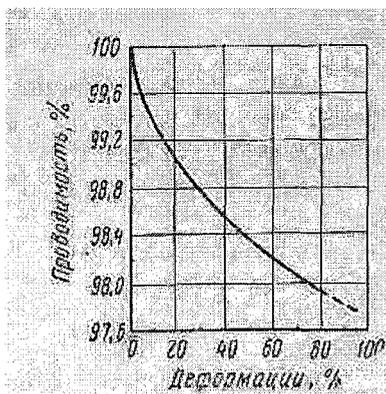


Рис. 5.5. Влияние пластической деформации на удельную проводимость меди.

Из приведенного графика следует, что наклепанная проволока имеет большее электрическое сопротивление, чем недеформированная. Влияние наклепа можно убрать, если отжечь проволоку при определенной температуре. Для меди эта температура составляет 400 – 450 °С, а для алюминия 200 – 250 °С.

Большое распространение получили диаграммы "состав – свойство". Две такие диаграммы, показывающие каким образом в зависимости от состава изменяется удельная проводимость сплава для механической смеси двух металлов и для твердого раствора, приведены на рис. 5.6.

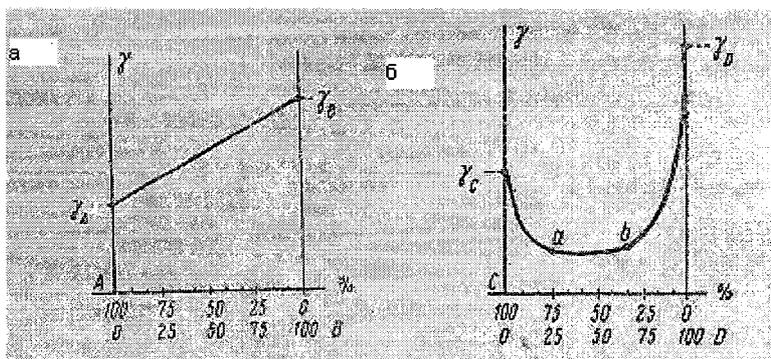


Рис. 5.6. Диаграмма изменения проводимости сплава двух металлов в зависимости от их процентного содержания в случае:
а – механической смеси; б – твердого раствора.

Проводниковые материалы делятся на материалы с малым удельным сопротивлением ($\rho \leq 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и материалы с большим удельным сопротивлением ($\rho \geq 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Эти материалы называют еще резистивными.

Из первой группы материалов изготавливают обмоточные, монтажные и установочные провода и кабели, из второй реостаты, добавочные и эталонные сопротивления.

Материалы первой группы должны обладать следующими свойствами:

- малым удельным электрическим сопротивлением;
- высокими механическими свойствами, в первую очередь, высокой прочностью на разрыв;

– хорошими технологическими параметрами, например, пластичностью;

– стойкостью к коррозии.

Материалы высокой проводимости классифицируют по группам: медь, сплавы меди с оловом (бронзы), сплавы меди с цинком (латуни) алюминий серебро и прочие металлы и сплавы. В отдельную группу выделяют материалы для электрических контактов.

В табл. 5.1 приведены основные свойства наиболее распространенных металлов высокой проводимости.

Таблица 5.1

Физические свойства металлов высокой проводимости

Металл	$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м	$\alpha_0 \cdot 10^4$, °C ⁻¹	λ , Вт/(м·°C)	$\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹	Φ , эВ	$T_{пл}$, °C	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³
Серебро Ag	0,016	40	415	19	4,4	961	10,50
Медь Cu	0,0172	43	390	16	4,3	1083	8,94
Золото Au	0,024	38	293	14	4,8	1063	19,30
Алюминий Al	0,028	42	209	24	4,3	657	2,70
Бериллий Be	0,040	60	167	13	3,9	1284	1,85
Магний Mg	0,045	42	167	26	3,6	651	1,74
Иридий Ir	0,054	41	146	6,5	–	2410	22,50
Вольфрам W	0,055	46	168	4,4	4,5	3380	19,30
Молибден Mo	0,057	46	151	5,1	4,2	2620	10,20
Цинк Zn	0,059	–	111	31	–	420	7,14
Кобальт Co	0,062	60	79	12	–	1492	8,71
Никель Ni	0,073	65	95	13	5,0	1455	8,90
Кадмий Cd	0,076	42	93	30	4,0	321	8,65
Индий In	0,090	47	25	25	–	156	7,28
Железо Fe	0,098	60	73	11	4,5	1535	7,87
Платина Pt	0,105	39	71	9	–	1773	21,40
Олово Sn	0,120	41	65	23	4,4	232	7,31

Медь является наиболее распространенным материалом для изготовления проводников. Она наилучшим образом отвечает сформулированным выше требованиям. В нормальной атмосфере медь устойчива к коррозии. Ее поверхность покрывается пленкой окиси CuO, которая препятствует дальнейшему окислению меди.

Коррозию меди могут вызывать сернистый газ SO^2 , сероводород H_2S , аммиак NH_3 , окислы азота NO , пары азотной кислоты.

Из меди изготавливают различные электротехнические изделия: пластины для коллекторов электромашин, проволоку, листы, полосы. Из медной катанки изготавливают проволоку круглого сечения диаметром 0,020 – 9,42 мм в мягком отожженном ММ и твердом не отожженном МТ состоянии, а также для воздушных линий электрической связи МС. В табл. 5.2 приведены свойства медной проволоки круглого сечения.

Таблица 5.2

Свойства медной проволоки круглого сечения

Свойства	Марка проволоки	Диаметр проволоки, мм		
		0,02 – 1,00	2,0 – 4,0	5,00 – 9,42
σ_b , МПа	ММ	200 – 290	–	200 – 270
	МТ	400 – 450	–	360 – 400
	МС	–	430 – 440	–
δ , %	ММ	6 – 30	–	30 – 35
	МТ	0,6	–	1,0 – 2,0
	МС	–	1,5	–
$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м	ММ	0,01724	0,01724	0,01724
	МТ, МС	0,0180	–	0,0177 – 0,0178

Широкое применение в электротехнике находят сплавы меди. Важнейшими сплавами меди являются бронзы. Из них наибольшее распространение получили бериллиевая и кадмиевая. Из бериллиевой бронзы изготавливают токоведущие пружины, щеткодержатели скользящих контактов и электродов. Из кадмиевой бронзы делают контакторы, троллейные провода и коллекторные пластины. Эти бронзы обладают повышенной стойкостью к истиранию. Латунни обладают худшими по сравнению с бронзами электрическими свойствами.

Алюминий как и медь широко используется в электротехнике. Из него изготавливают провода для линий электропередач, распределительных устройств, обмоток трансформаторов и т.д.

Алюминий имеет ряд преимуществ перед медью. Во-первых, он дешевле, во-вторых, существенно легче (в 3,3 раза). Кроме этого, алюминий подвергается анодному окислению, при кото-

ром на его поверхности возникает слой оксидной изоляции, выдерживающий температуру выше, чем температура плавления алюминия.

К недостаткам алюминия относятся более высокое удельное сопротивление, подверженность коррозии, особенно в морской воде, меньшая, чем у меди механическая прочность. Изделия из алюминия плохо паяются из-за наличия окисной пленки на его поверхности.

Железо (сталь). В качестве проводникового материала используют мягкую сталь с содержанием углерода 0,10 – 0,15 %. Сталь используется для изготовления проводов линий электропередач небольших мощностей, для шин, рельсов. Поверхность стальных проводов покрывают цинком, защищая от коррозии.

Серебро лучше чем другие материалы проводит электрический ток. Но оно является остродефицитным материалом, поэтому используется ограниченно – в виде микропроводников, гальванических покрытий, слаботочных контактах.

Материалы для электрических контактов должны иметь высокую твердость, удельную проводимость, теплопроводность, химическую стойкость, а также быть устойчивы к атмосферной коррозии. Обычно контакты регламентированных размеров выполняют на основе порошкового вольфрам-никелевого сплава, пропитанного жидким серебром или медью. Часто используют биметаллические контакты, состоящие из подложки дешевого металла и поверхностного слоя из благородного металла.

Резистивные материалы по области применения разделяются на три группы: материалы для резисторов, материалы для термоэлектродов термопар и удлиняющих проводов, материалы для нагревателей. К каждой из групп предъявляются различные требования.

Материалы для резисторов должны обладать низким температурным коэффициентом электрического сопротивления, низкой термоЭДС в паре с медью, высокой стабильностью электрического сопротивления во времени. Основным материалом для резисторов является медно-никелевые сплавы.

Материалы для электронагревателей должны быть жаростойкими, иметь высокое электрическое сопротивление в сочетании с низким температурным коэффициентом сопротивления, пла-

стичностью для получения изделий различного сортамента. Для изготовления электронагревательных устройств используют железохромалюминивые и никель-хромовые прецизионные сплавы. Используются также нагреватели из керамических материалов, выполненные на основе карбида кремния.

Материалы для термоэлектродов термопар и удлиняющих проводов должны иметь высокую термоЭДС, коррозионную устойчивость в рабочих средах (морская вода), достаточную прочность и пластичность. Наибольший интерес для океанологии представляют термопреобразователи для измерения температуры, которые могут эксплуатироваться в диапазоне температур от -200 до 2500 °С. Диапазон рабочих температур проволочных термопреобразователей представлен в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Диапазон рабочих температур проволочных термопреобразователей

Тип преобразователя	Марка сплава термоэлектрода и обозначение термопары	Диапазон измеряемой температуры при длительном применении, °С	Предельная температура при кратковременном применении, °С
ТМК	Медь-копель М1-МНМц43-0,5	$-200 \dots +100$	100
ТХК	Хромель-копель НХ9,5-МНМц43-0,5	$-20 \dots +600$	800
ТХА	Хромель-алюмель НХ9,5-НмцАК2-2-1	$-200 \dots +1000$	1300
ТПП	Платинородий-платина ПР10-ПРО(ПР10/0)	$0 - 1300$	1600
ТПР	Платинородий-платинородий ПР30-ПР6 (ПР30/6)	$300 - 1600$	1800
ТВР	Вольфрам-рений ВР5-ВР20 (ВР5/20)	$0 - 2000$	2500

Для удлиняющих проводов термопар используют проволоку из никелевого и медно-никелевых сплавов. Основные их характеристики приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Свойства проволоки для удлиняющих проводов термопар

Сплав	ТермоЭДС в паре с образцом меди при температуре свободного конца проволоки 0 °С и рабочего конца 100 °С, мВ	$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м, при 20 °С	Диаметр проволоки, мм	σ_B , МПа	δ , %
				Не менее	
Хромель К	+2,09	0,67 ± 0,05	0,2; 0,3	490	15
			0,4 – 2,5		20
Копель	-4,77	0,47 ± 0,02	0,2; 0,3	390	15
			0,4 – 2,5		20
Константан	-4,10	0,465 ± 0,015	0,2; 0,3	390	15
			0,4 – 2,5		20
ТП	-0,64	0,025 ± 0,003	0,20 – 0,67	200	20
			0,70 – 2,5		25

В настоящее время все большее применение находят сверхпроводники. *Сверхпроводником* является вещество, основное свойство которого заключается в способности при определенных условиях быть в состоянии сверхпроводимости, т.е. его электрическое сопротивление исчезает при уменьшении температуры ниже некоторого значения, зависящего от материала и магнитной индукции.

Сверхпроводники характеризуются критической температурой T_c , при которой происходит переход материала в сверхпроводящее состояние; критической напряженностью внешнего магнитного поля B_c , при которой происходит разрушение сверхпроводящего состояния материала; критической плотностью тока J_c , протекающего через сверхпроводящий материал и создающего разрушающее сверхпроводимость магнитное поле. Последние две характеристики зависят от температуры сверхпроводника. Для технических приложений желательно иметь сверхпроводники с максимально высокими критическими параметрами.

Сверхпроводники делятся на две основные группы: сверхпроводники I рода – все чистые сверхпроводящие металлы (кроме технеция, ванадия и ниобия) и сверхпроводники II рода – чистый технеций, ванадий, ниобий, сверхпроводящие сплавы и соединения.

Постоянное магнитное поле в сверхпроводники I рода не проникает, за исключением тонкого поверхностного слоя. По поверхности такого сверхпроводника, находящегося в магнитном поле всегда течет ток. Сверхпроводники II рода имеют два критических значения внешнего магнитного поля. Если напряженность магнитного поля меньше B_{c1} , то сверхпроводник II рода ни чем не отличается от сверхпроводника I рода. При значениях напряженности магнитного поля $B_{c1} < B < B_{c2}$ сверхпроводник II рода имеет уменьшенное по сравнению со сверхпроводником I рода электрическое сопротивление. Он как бы частично находится в сверхпроводящем состоянии. По мере возрастания напряженности магнитного поля сверхпроводящего состояния в материале становится все меньше и при втором критическом значении B_{c2} оно полностью исчезает.

В настоящее время известно более 1000 сверхпроводящих материалов. Диапазон температур, при которых достигается сверхпроводящее состояние, составляет $-270 \dots -250$ °C ($3 - 23$ °K). Со всем недавно было экспериментально открыто явление высокотемпературной сверхпроводимости в керамиках специального вида. В системе La-Ba-Cu-O в 1986 г. была получена критическая температура, равная ≈ 35 °K, а уже в 1987 г. удалось создать длинно высокотемпературный проводник $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ с критической температурой $80 - 90$ °K.

5.2. Полупроводниковые и диэлектрические материалы

К полупроводниковым материалам относится ряд элементов III – VI групп периодической системы Д.И.Менделеева, а также химические соединения на основе этих элементов.

Электрические свойства полупроводников объясняются особенностями их энергетической диаграммы. У полупроводников, в отличие от металлов, между зоной, заполненной электронами, и зоной свободных энергетических уровней существует запрещенная зона. Ширина этой зоны относительно мала, поэтому при возбуждении электронов (нагрев, энергия внешнего поля) возможен их переход через запрещенную зону, при котором возникает про-

водимость. В результате у полупроводников проводимость с повышением температуры возрастает.

Наибольшее распространение получили полупроводники германий и кремний, имеющие кристаллическую решетку, в которой каждый атом с четырьмя валентными электронами достраивает внешнюю электронную оболочку до восьми электронов за счет других атомов. Каждый атом имеет четыре ковалентные связи с соседними атомами (рис. 5.7).

В полупроводниках различают *собственную* проводимость, возникающую при разрушении ковалентных связей в химически чистом материале, а также проводимость, связанную с наличием в материале инородных примесей. Примеси делятся на *донорные* и *акцепторные*. Для германия и кремния донорными примесями являются пятивалентные фосфор, сурьма, мышьяк. Четыре из пятивалентных электронов образуют ковалентные связи, а не задействованный пятый электрон становится носителем электрического тока. Полупроводники с донорными примесями называются *электронными*, или *n-типа* (рис. 5.7). Акцепторными примесями являются трехвалентные индий, бор, алюминий. При внедрении этих элементов в кристаллическую решетку полупроводника образуются "дырки" – незаполненные электронами ковалентные связи. Соседние электроны могут заполнять эти связи, при этом их перемещение создает новые "дырки", поэтому "дырка" перемещается по полупроводнику подобно положительному заряду. Такой тип проводимости называется *дырочным*, или *p-тип* (рис. 5.7).

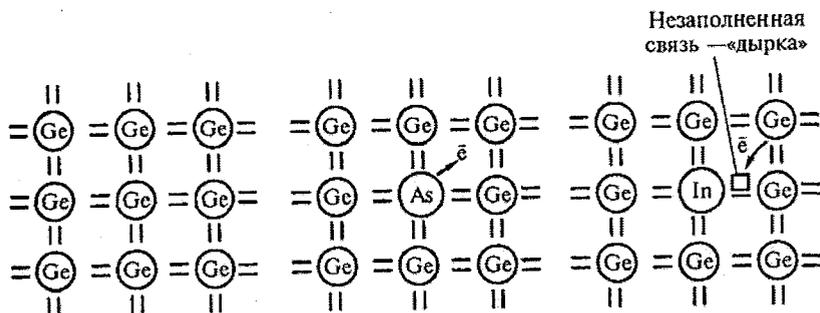


Рис. 5.7. Схема ковалентной связи между атомами германия: а – без примесей; б – с донорной примесью мышьяка; в – с акцепторной примесью индия.

На основе полупроводников созданы различные приборы, в которых используются зависимость их электропроводности: от температуры – термисторы; от светового потока – фоторезисторы; от электрического поля – варисторы и т.д. Полупроводники используются при создании солнечных батарей, выпрямителей, транзисторов и интегральных схем.

Диэлектрик – материал, основным электрическим свойством которого является способность поляризоваться в электрическом поле. Другим основным электрическим свойством диэлектриков является высокое удельное электрическое сопротивление (10^7 – 10^{18} Ом·м), которое обуславливается широкой зоной запрещенных энергий.

Процесс упорядочения связанных электрических зарядов внутри диэлектрика под действием внешнего поля, приводящий к возникновению электрического момента, называется *поляризацией*. В зависимости от строения диэлектрика возникает *полярная*, *неполярная* или *ионная* поляризация. Полярная поляризация возникает в тех диэлектриках, молекулы которых обладают дипольным моментом и могут переориентироваться во внешнем поле. Поляризация неполярных диэлектриков обуславливается упругими смещениями и деформациями электронных оболочек относительно ядер. Ионная поляризация обусловлена упругим смещением разноименных ионов относительно их положения равновесия.

Способность диэлектрика поляризоваться может быть охарактеризована *абсолютной диэлектрической проницаемостью* ϵ_a . Эта величина связана с емкостью плоского конденсатора, в который помещен диэлектрик:

$$C = \frac{\epsilon_a S}{h},$$

где S – площадь одного из электродов конденсатора; h – толщина диэлектрика.

В соответствии с этой формулой, чем больше ϵ_a , тем больше емкость конденсатора. Часто диэлектрики характеризуют *относительной диэлектрической проницаемостью* ϵ_r , которая связана с абсолютной соотношением

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r,$$

где $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

На величину относительной диэлектрической проницаемости оказывают влияние внешние факторы, такие как частота внешнего электрического поля, температура, давление и др. В табл. 5.5 приведено влияние важнейших факторов на различные типы диэлектриков.

Таблица 5.5

**Влияние внешних факторов
на относительную диэлектрическую проницаемость**

Фактор	Тип диэлектрика		
	полярный	неполярный	ионный
Частота внешнего электрического поля	При возрастании частоты ϵ_r сначала остается постоянной, а затем уменьшается	Практически не зависит	Практически не зависит
Температура	Сначала увеличивается, а затем падает с ростом температуры	Слабо уменьшается с ростом температуры	Сложным образом зависит от температуры, обычно слабо возрастая при увеличении температуры

Промышленность выпускает диэлектрические материалы, в основном предназначенные для использования в качестве электроизоляционных материалов (ЭМ). Среди них различают электроизоляционный слоистый пластик, фольгируемый ЭМ, слюдо-содержащий ЭМ, пленкосодержащий ЭМ, гибкая электроизоляционная трубка, электроизоляционный лак и компаунд и т.д.

Большое распространение получило использование электрических кристаллов, которые подразделяются на *сегнетоэлектрики* и *пьезоэлектрики*. Сегнетоэлектрик обладает спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено внешними воздействиями. Пьезоэлектрик поляризуется под действием внешних механических напряжений (прямой пьезоэффект) или деформируется под действием электрического поля (обратный пьезоэффект). Отдельной разновидностью электрических кристаллов являются жидкие кристаллы, способные создавать упорядоченные структуры при внешнем воздействии.

5.3. Магнитные материалы

Отличительной способностью магнитных материалов является их способность намагничиваться в магнитных полях. В результате намагничивания в ферромагнитном материале возникает магнитный поток, измеряемый в веберах (Вб). Состояние намагниченности магнитных материалов определяют магнитным потоком, проходящим через площадь поперечного сечения магнитного материала. Величина магнитного потока называется магнитной индукцией B и измеряется в тесла (Тл) $= \text{Вб}/\text{м}^2$. Магнитная индукция зависит от напряженности магнитного поля H и магнитной проницаемости материала μ_a :

$$B = \mu_a H,$$

где $\mu_a = \mu\mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость ферромагнитного материала; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость. График зависимости магнитной проницаемости μ от напряженности магнитного поля имеет одинаковый вид для всех ферромагнитных материалов. Этот график характеризуется величинами *начальной магнитной проницаемости* μ_H при $H \rightarrow 0$ и *наибольшим значением магнитной проницаемости* μ_M .

Во всех ферромагнитных материалах наблюдается явление магнитного гистерезиса, которое проявляется при намагничивании материала сначала в одном, а затем в другом направлениях. Гистерезис характеризуется следующими величинами остаточной *магнитной индукцией* B_r при $H \rightarrow 0$, *индукцией насыщения* B_S и *коэрцитивной силой* H_c – напряженность магнитного поля, при которой магнитная индукция становится равной нулю (рис. 5.8).

В зависимости от величины коэрцитивной силы магнитные материалы разделяют на магнитотвердые ($H_c \geq 4$ кА/м) и магнитомягкие ($H_c < 4$ кА/м). Магнитотвердые материалы имеют широкую петлю гистерезиса и перемагничиваются с большим трудом. У магнитомягких материалов петля гистерезиса узкая и они легко перемагничиваются в переменных магнитных полях.

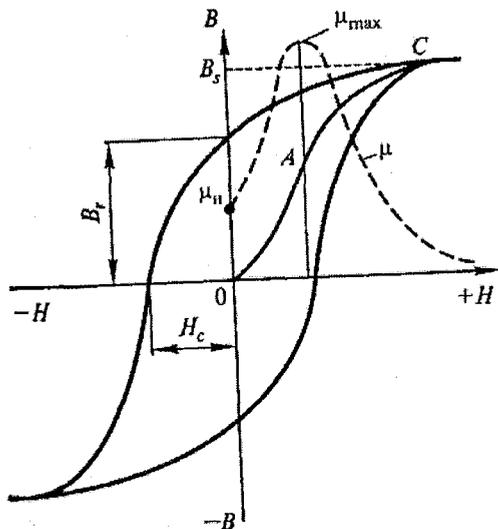


Рис. 5.8. Кривая намагничивания (петля гистерезиса) ферромагнетика.

Основными показателями свойств магнитотвердых материалов является удельная магнитная энергия $W = 0,5BH$, а также ее максимальное значение, от которого зависит объем магнита для создания магнитного поля в заданном воздушном зазоре. Чем больше эта величина, тем меньше объем магнита и, соответственно, его масса.

Магнитотвердые материалы должны иметь максимальные значения коэрцитивной силы H_c , максимальной магнитной энергии W_{max} и остаточной индукции B_r . Эти материалы используют для производства машин постоянного тока, синхронных машин, шаговых двигателей; для элементов с внешней и внутренней памятью; для носителей и аппаратуры воспроизведения гармонических и импульсных сигналов.

Магнитотвердые материалы классифицируются по составу и основному способу получения. В табл. 5.6 представлены основные группы магнитотвердых материалов, в ней же указаны диапазоны нормированных магнитных параметров.

Таблица 5.6

Магнитные характеристики магнитотвердых материалов различных групп

Группа	Марка	W_{\max} , кДж/м ³	B_r , Тл	H_C , кА/м
Легированные стали	EX3	0,595	0,95	4,775
	EX9K15M2	1,035	0,80	11,94
Литые сплавы Fe-Al-Ni	ЮНД4	3,6	0,50	40
	ЮНД8	5,1	0,60	44
Fe-Al-Ni-Co	ЮНДК15	6,0	0,75	48
	ЮНДК35Т5АА	40	1,05	115
Деформируемые сплавы Fe-Cr-Co	28X10K	3,5	0,8	10
	22X15КА	28	1,5	47
Pt-Co (литой)	ПлК78	39,8 – 43,8	0,75	270
Порошковые сплавы Fe-Al-Ni	ММК-1	3,0	0,60	24
	ММК-2	3,5	0,48	39
Fe-Al-Ni-Co	ММК-3	4,0	0,52	44
	ММК-11	16	0,70	128
Феррит бария	4БИ145	2,0	0,17	95
	28БА190	14,0	0,39	185
Феррит стронция	28СА250	14,0	0,39	240
Sm-CO	КС37А	65	0,82	540
Sm, Pr-Co	КСП37А	72,5	0,90	500

Магнитомягкие материалы, имеющие высокое значение начальной магнитной проницаемости, обладают способностью намагничиваться до насыщения даже в слабых магнитных полях. Их в основном используют для создания магнитопроводов переменного магнитного поля. К магнитомягким материалам относят: ферромагнитное особо чистое железо, низкоуглеродистые электротехнические стали (нелегированные и кремнистые), прецизионные низкоэрцитивные сплавы на железной и железноникелевой основе и др. Данные о магнитных и других свойствах мягкомангнитных материалов можно найти в справочниках. В табл. 5.7 для примера приводятся свойства железа.

Таблица 5.7

Состав и магнитные свойства железа

Железо	Содержание примесей, %		Магнитные свойства		
	углерод	кислород	μ_H	μ_{\max}	H_C , А/м
Технически чистое	0,020	0,060	250	7000	64,0
Электролитическое	0,020	0,010	600	15 000	28,0
Карбонильное	0,005	0,005	3300	21 000	6,4
Переплавленное в вакууме электро- литическое	0,010	—	—	61 000	7,2
Обработанное в водороде	0,005	0,003	6000	200 000	3,2
Обработанное в водороде особо тщательно	—	—	20 000	340 000	2,4
Монокристалл чи- стейшего железа, обработанный в водороде особо тщательно	—	—	—	1 430 000	0,8

Часть II

ЕСТЕСТВЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ЛЕД И СНЕГ

6. Лед и снег как природные материалы

В своей хозяйственной деятельности человек использует не только искусственные конструкционные материалы. Широкое применение находят разнообразные естественные материалы. К ним относятся песок, гравий, гранит, различные виды камня, используемые при строительстве.

Исторически именно естественные материалы использовались при создании человеком первых конструкций. С течением времени их роль в хозяйственной деятельности стала меньше, но использование не прекращалось. В наибольшей степени естественные материалы используются в строительстве различных зданий, дорог, гидротехнических сооружений, в основном в непосредственной близости от мест разработки.

В северных регионах одними из наиболее распространенных естественных материалов являются лед и снег. В минералогии лед рассматривается как специфическая горная порода. Горной породой называют часть земной коры, сложенной плотными и рыхлыми агрегатами, многоминеральными и полиминеральными по своему составу, различающиеся на осадочные, магматические и метаморфические породы. Горная порода образуется в результате протекания геологических процессов внутри земли и на ее поверхности. Приведенное выше определение подходит к природным льдам различных образований – снегу, фирну, льдам ледников, морских и пресных водоемов, льдам рыхлых пород. Только льды атмосферы, представляющие собой мелкие отдельные, не удовлетворяют определению и не являются горной породой.

По физико-генетическим и петрографо-генетическим основам формирования можно выделить основные группы ледяных пород:

- конжеляционные льды, образованные в результате замерзания воды;
- осадочные, к этой группе относятся различные формы снега;

– метаморфические, сформированные в процессе изменения внутренней энергии или под воздействием внешних сил.

Исследования показывают, что хозяйственное использование человеком льда и снега началось с незапамятных времен. Первобытные люди, жившие в регионах со снежно-ледяным покровом, использовали его для своих нужд. Косвенным подтверждением этого факта является выявленная биологами способность многих крупных зверей, например лосей, создавать зимой в лесу целую систему специальных «дорог» – троп, по которым животные легко передвигаются. Основным достоинством троп является сильное уплотнение снега, позволяющее животному передвигаться не проваливаясь. Существуют также наскальные изображения, датируемые каменным веком, на которых изображены люди, передвигающиеся на лыжах. Очевидно, для передвижения использовалась лыжня. Звериную тропу и лыжню можно трактовать как создание искусственной дороги из естественного материала – снега.

В настоящее время повышается интерес к этой группе естественных материалов, что обусловлено несколькими факторами, важнейшими из которых являются:

– дешевизна льда и снега по сравнению с другими естественными и искусственными конструкционными материалами;

– разработка эффективных методов получения льда и снега, что позволяет отказаться от его транспортировки на большие расстояния;

– разработка методов регулирования теплового режима сооружений из льда и снега.

Основное отличие льда от других пород, распространенных на поверхности Земли, заключается в том, что он практически постоянно находится в состоянии, близком к фазовому переходу в воду. На рис. 6.1 приведены температуры, которые могут выдерживать отдельные окружающие нас материалы. На этом графике по оси абсцисс в процентах отложено отношение температуры материала к температуре плавления (температуры выражены в градусах абсолютной температурной шкалы Кельвина). По оси ординат отложены температуры в градусах Кельвина и Цельсия. Из этого графика следует, что в естественных для Земли условиях лед постоянно находится в непосредственной близости от своей точки плавления.

ления. Предельная близость льда к состоянию фазового перехода оказывает существенное влияние на его свойства.

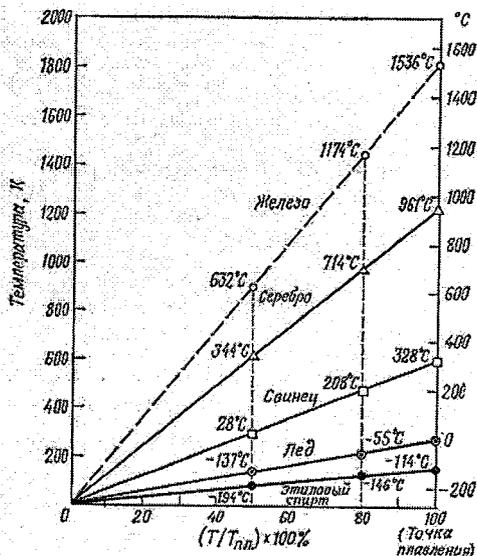


Рис. 6.1. График эквивалентных температур различных материалов по отношению к температуре их плавления.

С точки зрения ледоведения, лед представляет собой низкотемпературную монокристаллическую породу. Монокристалличность возникает благодаря устойчивости льда к воздействию инородных примесей. Лед не вступает с ними в химические реакции, не создает твердых растворов и сростков с кристаллами других веществ. Все инородные примеси вытесняются растущими кристаллами к их границам в рассол. Отсюда следует, что устойчивостью к воздействию инородных примесей обладают только кристаллы льда, а не весь ледяной покров в целом. Важным отличием льда от других конструкционных материалов, в первую очередь металлов, является размер кристаллов. Металлы состоят из мелких кристаллов, измеряемых долями миллиметров в поперечнике. Поперечный же размер кристаллов льда изменяется от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров.

Разработкой методов и оборудования для использования льда в хозяйственной деятельности и борьбы с его вредным влиянием

занимается специальная техническая наука – *ледотехника*. В ледотехнике разрабатываются методики исследования и расчета инженерных сооружений, находящихся под воздействием гляциальных процессов. Одним из перспективных направлений ледотехники является конструирование инструментов и механизмов, предназначенных для разработки естественного льда и изготовления искусственного.

При использовании льда и снега в хозяйственной деятельности необходимо знать их свойства. К основным свойствам относят: плотность и пористость; термодинамические характеристики; упругие, пластические, реологические свойства; механические характеристики; адгезию к инородным телам; оптические и электрические свойства. В данном пособии будут рассмотрены те свойства льда и снега, знание которых наиболее часто используется в хозяйственной деятельности. Поэтому из обширного материала, относящегося к оптическим и электрическим свойствам льда и снега, будут представлены только их радиационные свойства, учет которых необходим при анализе теплового режима сооружений изо льда и снега.

6.1. Пористость и плотность

Пористостью льда и снега называют объем газовых полостей, выраженный в процентах, относительно объема всей породы. Природный лед всегда содержит поры, заполненные воздухом, газом и водяными парами. Различают сообщающиеся между собой поры (открытые) и замкнутые воздушные включения (пузырьки). Пористость льда и снега формируется в процессе образования ледяного и снежного покровов. Этот процесс называется первичным или сингенетическим. С течением времени пористость может претерпевать значительные изменения. Этот процесс называется вторичным или эпигенетическим. В криосфере пористость колеблется в широких пределах, представление о границах ее изменения даст табл. 6.1.

Плотность и пористость связаны следующей зависимостью:

$$n = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}, \quad (6.1)$$

где n – пористость льда; $\rho_0 = 916,8 \text{ кг/м}^3$ – плотность чистого, лишенного пузырьков льда, теоретически вычисленная по размерам элементарной ячейки кристалла при $T = 0^\circ\text{C}$ и $P = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (1 атм); ρ – плотность исследуемого льда.

Таблица 6.1

Пористость льдов криосферы

Льды криосферы	Пористость, %		
	максимальная	минимальная	средняя
Снег	99,0	45,5	75,0
Фирн	50,0	30,0	40,0
Ледниковый лед	4,0	1,0	2,5
Айсберги	15,0	7,0	11,0
Морской лед	8,0	0,7	3,0

При определении пористости снега формулу (6.1) можно применять только к сухому снегу. Во влажном снеге поры между кристаллами льда частично заполнены водой. Отношение объема воздуха, заключенного в снеге к общему объему (воздушная пористость влажного снега), вычисляется по формуле

$$n = \frac{\rho_0 - \rho'}{\rho_0} (1 - 0,083W),$$

где ρ' – плотность влажного снега; W – влажность снега, определяемая как отношение массы воды к общей массе снега.

В зависимости от типа снега его плотность и пористость изменяются очень сильно. В табл. 6.2 приведены значения плотности и пористости сухого и влажного снега.

Плотность льда зависит от температуры, давления, солёности и других факторов. Зависимость плотности льда от температуры T ($^\circ\text{C}$) и давления P (Па) задается следующей эмпирической формулой:

$$\rho(P, T) = \rho_0 \left[1 + 0,94 \cdot 10^{-7} \left(\frac{P}{1,01 \cdot 10^5} - 1 \right) \right] \left(1 - 1,53 \cdot 10^{-4} T \right).$$

Плотность и пористость снега

Вид снега		Плотность ρ , кг/м ³	Пористость n
Свежий снег	«дикий» (рыхлый, пушистый)	10 – 30	0,99 – 0,97
	порошкообразный	30 – 60	0,97 – 0,93
	слабо уплотненный ветром	60 – 100	0,93 – 0,89
	сильно уплотненный ветром	100 – 300	0,89 – 0,67
Старый снег	снег-плавун	200 – 300	0,78 – 0,67
	сухой осевший	200 – 400	0,78 – 0,56
	мокрый осевший	400 – 550	0,56 – 0,50
	сухой фирнизированный	400 – 700	0,56 – 0,24
	мокрый фирнизированный	600 – 800	0,50 – 0,20

Одним из основных факторов, влияющих на многие физические свойства морского льда, в том числе на пористость и плотность, является соленость. Под соленостью морского льда понимается суммарная масса содержащихся в 1 кг талой воды главных ионов хлора, брома, фтора и др., содержащихся в морской воде. Соленость льда, как и соленость воды, измеряется в промилле (‰). Соленость льда формируется в процессе его нарастания. На уровень солености льда оказывает влияние соленость воды и скорость нарастания льда. Это влияние описывается эмпирической формулой В.Л. Цурикова:

$$S_l = S_w \frac{7\sqrt{W}}{7\sqrt{W} + 10,30},$$

где S_l – соленость льда, ‰; S_w – соленость воды, ‰; W – скорость нарастания льда, мм/ч.

В ледяном покрове все время происходят процессы, приводящие к изменению его солености. Это миграция, диффузия и гравитационный сток рассола, замещение рассола морской водой и т.п. Влияние солености и температуры морского льда на его плотность показано в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Плотность морского льда, не содержащего включения воздуха (кг/м³)

Соленость льда, ‰	Температура льда, °С						
	-2	-4	-6	-8	-10	-15	-20
2	924	922	920	921	921	922	923
4	927	925	924	923	923	923	925
6	932	928	926	926	926	925	926
8	936	932	928	928	928	928	929
10	939	935	931	929	929	929	930
15	963	944	939	937	935	964	935

6.2. Теплофизические и радиационные свойства

К теплофизическим свойствам относятся температура T , теплоемкость C , теплота фазовых превращений L , теплопроводность λ , термическое расширение.

Основной частью всех льдов, составляющих криосферу, является чистый лед. Все остальные составные части того или иного вида льда (рассол, кристаллогидраты солей, воздушные, паровые и газовые включения) можно рассматривать как примеси. Поэтому во многом теплофизические свойства различных видов льда будут определяться теплофизическими свойствами чистого льда. Сказанное не совсем справедливо для свежевыпавшего снега. Однако знание теплофизических свойств чистого льда позволяет определить эти характеристики и для снега. Ниже будут рассмотрены теплофизические характеристики чистого льда, а затем те же характеристики основных видов льда.

Теоретически теплота фазовых переходов вода – лед может быть рассчитана по уравнению Клайперона – Клаузиуса:

$$T \frac{dP}{dT} = \frac{L}{v_W - v_I},$$

где v_W, v_I – отнесенный к единице массы объем жидкости и льда при фазовом переходе, м³/кг; L – удельная теплота фазового перехода при температуре T . Результаты расчетов по этой формуле представлены в табл. 6.4, из которых следует, что с понижением температуры величина удельной теплоты плавления уменьшается.

Зависимость удельной теплоты фазовых переходов «вода – лед»

$T, ^\circ\text{C}$	0	-5	-10	-15	-20	-22
$L, \text{кДж/кг}$	334	308	285	262	241	235

Удельная теплоемкость пресноводного льда численно равна количеству тепла, которое необходимо сообщить единице массы льда, чтобы повысить его температуру на 1°C . Из термодинамики известно, что для описания теплоемкости вещества обычно используют два значения, полученные при постоянном объеме и при постоянном давлении. Однако многочисленные эксперименты показывают, что для льда различие между этими двумя значениями не превышает 2 %. Поэтому в большинстве ледотермических расчетов используют их среднее значение. Теплопроводность чистого льда, в первую очередь, зависит от температуры и давления. При нормальном давлении теплоемкость уменьшается при понижении температуры. Эта связь описывается эмпирическими выражениями Джиока и Стаута:

$$c_l = 2,108 + 0,007548T, \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}, \quad (6.2)$$

или Дикинсона и Осборна:

$$c_l = 2,114 + 0,007787T, \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}. \quad (6.3)$$

Одной из важнейших теплофизических характеристик льда является его теплопроводность. Многочисленные исследования показали, что при нормальном давлении вблизи точки плавления средняя теплопроводность чистого льда составляет $2,26 \pm 0,26$ Вт/м·К. Эта величина примерно в четыре раза больше, чем теплопроводность чистой воды при 0°C .

Зависимость теплопроводности от температуры описывается приближенной формулой Ю.Л. Назинцева:

$$\lambda_l = 2,24(1 - 0,0048T) \text{ Вт/м}\cdot\text{К}.$$

При повышении давления происходит незначительное линейное уменьшение величины теплопроводности чистого льда. Также в пределах от 800 до 910 кг/м^3 существует линейная зависимость

от плотности, в соответствии с которой теплопроводность увеличивается при возрастании плотности.

Мерой тепловой деформации льда являются коэффициенты линейного α и объемного γ расширения льда, которые задаются следующими формулами:

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dT}, \quad \gamma = \frac{3l^2}{l_0^3} \frac{dl}{dT}, \quad (6.4)$$

где l_0, l – первоначальный и после воздействия температуры линейные размеры льда соответственно.

Формулы (6.4) показывают, как изменяется относительная длина или относительный объем при изменении температуры на 1° . Из этих формул следует, что $\gamma \approx 3\alpha$.

Тепловая деформация льда связана с изменением его плотности соотношением $\rho = \nu + \gamma$, где ν – удельный объем льда при температуре 0°C . В соответствии с этим выражением плотность пресного льда при изменении температуры от 0 до -180°C возрастает от 910 до 941 кг/м^3 , при этом коэффициент объемного расширения уменьшается. В практически важном диапазоне изменения температуры от 0 до -30°C зависимость $\gamma = \gamma(T)$ описывается следующим эмпирическим выражением:

$$\gamma = (1,58 + 0,0054T) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}.$$

Температура плавления льда зависит от давления. Эта зависимость описывается следующим эмпирическим соотношением:

$$p = 0,098 - 12,65T_k - 0,149T_k^2 \text{ МПа.}$$

На теплофизические свойства морского льда оказывают влияние содержащиеся в нем в виде рассола и/или кристаллогидратов соли химических соединений, а также наличие воздушных, паровых и газовых включений. Хотя методы экспериментального определения теплофизических характеристик морского льда известны, до сих пор не существует удобных простых приборов для проведения таких исследований в полевых условиях. По этой причине натурные данные носят отрывочный характер. Большинство ис-

пользуемых в расчетах теплофизических величин получено расчетным путем с помощью теоретических моделей, которые используют информацию о свойствах пресного льда. В отличие от морского льда пресный лед достаточно просто может быть получен в лабораторных условиях.

В морском льду процессы кристаллизации воды из рассола или плавления льда протекают в некотором диапазоне температур, который определяется температурой замерзания воды данной солености и температурой полного замерзания всей жидкой фазы. Это обстоятельство делает невозможным в явном виде применить к морскому льду понятие удельной теплоты плавления. Для описания таких сложных процессов вводится эффективная теплота плавления морского льда, под которой понимают эффективное тепло L_e необходимое для плавления единицы массы льда имеющего температуру T и соленость S_I . Эта теплота складывается из затрат энергии на плавление чистого льда и затрат тепла на поднятие температуры льда и рассола до значения θ , при котором происходит таяние льда данной солености. Эта температура задается эмпирическим соотношением:

$$-T_k = (3 + 52,7S + 0,04S^2 + 0,0004S^3) \cdot 10^{-3},$$

где S – соленость, ‰.

Для расчета эффективной теплоты плавления морского льда Ю.П. Дорониным была получена следующая формула:

$$L_e = [c_l(1 - S_I) + c_b S_I](T - \theta) + (c_b - c_l) \frac{S_I}{\alpha} \ln \frac{T}{\theta} - L_I \left(1 - \frac{S_I}{S_b}\right), \quad (6.5)$$

где α – коэффициент пропорциональности между концентрацией рассола и температурой; c_b, S_b – теплоемкость и соленость рассола соответственно.

Теплоемкость рассола вычисляется по эмпирической формуле, соленость рассола подставляется в ‰:

$$c_b = 4,1868 - 4,55 \cdot 10^{-3} S_b, \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}.$$

С помощью выражения (6.5) Ю.Л. Назинцевым и В.В. Пановым выполнены расчеты эффективной теплоты плавления льда. Результаты этих расчетов приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Эффективная теплота плавления морского льда при различных температурах и соленостях, кДж/кг·К

T, °C	Соленость льда, ‰									
	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
-2	337	319	300	281	263	244	197	149	102	54
-4	342	332	322	312	303	293	268	244	220	203
-6	346	339	332	326	319	312	294	278	262	245
-8	350	345	340	334	329	323	310	297	284	270
-10	354	350	345	340	336	332	320	306	297	286
-12	358	354	350	346	342	338	328	318	308	298
-14	363	358	355	351	348	344	335	326	317	308
-16	367	362	359	356	353	349	341	335	325	317
-18	371	366	363	360	357	354	346	339	331	324
-20	375	370	368	365	362	360	352	346	339	332
-24	384	378	376	374	372	370	365	360	356	351
-26	388	382	380	379	377	375	372	368	364	360
-28	392	386	384	383	382	380	377	374	370	366
-30	396	390	388	387	386	385	381	378	375	372

Анализ данных, приведенных в этой таблице, показывает, что с понижением температуры происходит увеличение эффективной теплоты плавления морского льда, а при увеличении солености эффективная теплота уменьшается.

По предложению Б.А. Савельева, количество тепла, необходимое для изменения температуры морского льда на 1 градус, называют эффективной теплоемкостью морского льда. В эту величину входят затраты тепла на фазовые превращения воды и солей. Согласно Ю.П. Доронину, эффективная теплоемкость морского льда определяется теплоемкостью и массами его компонент, а также удельной теплотой фазовых переходов. Для расчета эффективной теплоемкости морского льда получена следующая формула:

$$\begin{aligned}
c_{ST} = c_I \left[1 - \frac{S_I}{S_b} + \frac{M_{CS}}{MS_b} (1 - S_b) \right] + c_b \left(\frac{S_I}{S_b} - \frac{M_{CS}}{MS_b} \right) + c_S \frac{M_{CS}}{M} + \\
+ L_I \left[\frac{S_I}{S_b} \left(1 - \frac{M_{CS}}{MS_I} \right) \frac{dS_b}{dT} + \frac{1}{MS_b} (1 - S_b) \frac{dM_{CS}}{dT} \right] + \frac{L_S dM_{CS}}{MdT}, \quad (6.6)
\end{aligned}$$

где M – масса морского льда; M_{CS} – масса солей, находящихся в кристаллическом состоянии; c_S – средневзвешенное удельной теплоемкости отдельных кристаллогидратов солей; L_S – средневзвешенное значение удельной теплоты растворения (или кристаллизации) кристаллогидратов в морском льду.

Первый член уравнения (6.6) описывает изменение теплоемкости пресного льда при изменении температуры. Второе и третье слагаемые показывают, как изменяется теплоемкость рассола и кристаллогидратов солей при изменении температуры. Последние два члена описывают затраты тепла на протекание фазовых перехода «вода – лед» и «рассол – кристаллогидраты».

По формуле (6.6) были рассчитаны значения эффективной теплоемкости льда. Результаты этих расчетов представлены на рис. 6.2 и в табл. 6.6.

Приведенные выше данные свидетельствуют о наличии некой аномалии в поведении эффективной теплоемкости льда при понижении температуры. Удельная теплоемкость плавно уменьшается до температуры $-22,9$ °С. При этой температуре происходит резкий скачок теплоемкости, а затем она также продолжает плавно спадать при дальнейшем понижении температуры. Наличие скачка объясняется выпадением в осадок $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, при этом резко изменяется количественный состав различных компонент морского льда.

Хотя теплопроводность является одной из важнейших характеристик морского льда, для ее теоретического описания не имеется вполне определенной расчетной модели. Применение той или иной расчетной модели для определения коэффициента теплопроводности льда зависит от его структуры, а также от количества воздушных включений.

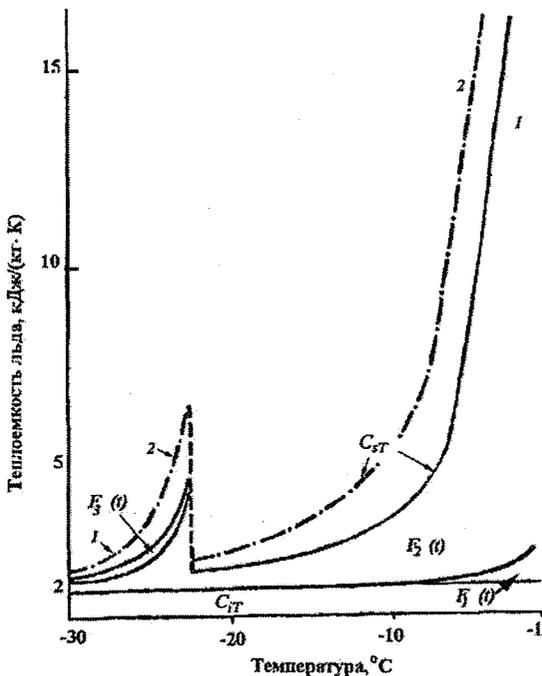


Рис. 6.2. Зависимость эффективной теплоемкости льда соленостью 10 % (1) и 20 % (2) от температуры: $F_1(T)$ – вклад теплоемкости пресного льда; $F_2(T)$ – вклад теплоемкости рассола, $F_3(T)$ – вклад фазовых переходов.

Теплопроводность рассола обычно определяют по эмпирической формуле Швердфегера:

$$\lambda_b = 0,523 + 0,0125T + 0,000059T^2, \text{ Вт/м·К.}$$

Теплопроводность воздуха при 0°C составляет $\lambda_a = 2,37 \cdot 10^{-2}$ Вт/м·К. Теплопроводность льда с хаотически расположенными в нем сферическими воздушными включениями может быть рассчитана по формуле Максвелла:

$$\lambda_{la} = \lambda_l \frac{2\lambda_l + \lambda_a + 2n(\lambda_l - \lambda_a)}{2\lambda_l + \lambda_a + n(\lambda_l - \lambda_a)}, \quad (6.7)$$

где n – пористость льда.

Эффективная теплоемкость морского льда при различных температурах и соленостях, кДж/(кг·К)

$S_p, \%$	Температура льда, °С														
	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20	-22	-24	-26	-28	-30
0	2,10	2,08	2,07	2,05	2,03	2,02	2,00	1,99	1,97	1,95	1,94	1,92	1,90	1,89	1,88
2	11,25	4,39	3,10	2,55	2,38	2,26	2,22	2,13	2,09	2,09	2,05	2,22	2,05	2,01	1,97
4	20,4	6,73	1,14	3,01	2,72	2,55	2,43	2,30	2,26	2,17	2,13	2,51	2,22	2,09	2,01
6	29,5	9,03	5,19	3,55	3,10	2,80	2,63	2,47	2,38	2,30	2,22	2,80	2,38	2,17	2,09
8	38,7	11,4	6,23	4,01	3,43	3,05	2,80	2,63	2,51	2,43	2,34	3,10	2,51	2,26	2,13
12	47,8	13,7	7,28	4,52	3,76	3,30	3,01	2,80	2,63	2,51	2,43	2,39	2,68	2,38	2,22
15	70,7	19,5	9,87	5,72	4,64	3,97	3,51	3,22	2,97	2,80	2,63	4,14	3,05	2,59	2,33
20	93,6	25,3	12,5	6,94	5,52	4,64	4,01	3,64	3,30	3,10	2,89	4,85	3,43	2,83	2,51
25	116	31,1	15,1	8,20	6,40	5,27	4,56	4,01	3,64	3,35	3,14	5,60	3,85	3,10	2,68
30	139	36,9	17,7	9,41	7,28	5,94	5,06	4,43	3,97	3,64	3,39	6,31	4,22	3,30	2,83

Ю.Л. Назинцевым предложена формула для нахождения теплопроводности морского льда, содержащего равномерно распределенные по объему сферические ячейки рассола и воздуха.

$$\lambda_{lab} = \lambda_{Ia} \frac{1 - v_b \left(1 - k \frac{\lambda_b}{\lambda_{Ia}} \right)}{1 + (k - 1)v_b}, \quad k = 3 \frac{\lambda_{Ia}}{2\lambda_{Ia} + \lambda_b},$$

где λ_{Ia} — теплопроводность пористого льда, определяемая по формуле (6.7); v_b — относительное содержание рассола в единице объема морского льда.

Для льда вертикальноволокнистой структуры лучше всего подходит формула Швердфегера:

$$\lambda_{Ib} = \lambda_I \left(1 - \frac{S_I}{S_b} \right) + \lambda_b \frac{S_I}{S_b}.$$

Теплопроводность морского льда зернистой структуры может быть приближенно определена по формуле

$$\lambda_{Ib} = \frac{\lambda_I}{\left\{ v_b \lambda_I [(3 - v_b) \lambda_b] + 1 \right\} \frac{3}{v_b \lambda_b}}. \quad (6.8)$$

Ю.Л. Назинцевым проведены лабораторные опыты, в которых исследовалось влияние относительного объема рассола на величину коэффициента теплопроводности льда. Сравнение результатов экспериментов с данными расчета по формуле (6.8) подтвердило возможность ее использования для приближенных расчетов.

Аномальные свойства морского льда проявляются в процессе термического расширения. При термическом расширении в морском льду протекают два различных физических процесса: собственно термическое расширение отдельных компонентов льда и изменение их относительной массы при фазовых переходах. В зависимости от температуры и солёности льда будет превалировать тот или иной процесс. Например, при понижении температуры входящие в состав морского льда пресный лед и соли сжимаются,

но общий объем единицы массы морского льда возрастает. Это происходит потому, что вымерзает часть рассола и образуется дополнительная масса льда. Коэффициент объемного расширения морского льда γ_s можно рассчитать по формуле

$$\gamma_s = \gamma_i + \frac{S_i(v_i - v_w)}{S_b(S_b - S_i)} \frac{dS_b}{dT},$$

где γ_i – коэффициент объемного расширения пресноводного льда; v_i, v_w – удельные объемы льда и воды соответственно; S_i, S_b – соленость льда и рассола.

В этой формуле не учитываются изменения объема, связанные с переходом солей в твердое состояние, или в рассол. Коэффициент объемного расширения льда приведен в табл. 6.7, его связь с коэффициентом линейного расширения задается следующим выражением: $\gamma_s = 3\alpha_s$.

Таблица 6.7

Коэффициент объемного расширения морского льда, $\gamma_s \cdot 10^4 \text{ K}^{-1}$

T, °C	Соленость морского льда, ‰								
	0	2	4	6	8	10	15	20	25
-2	1,6	-22,7	-46,9	-71,2	-95,5	— 119,7	— 180,3	— 241,0	— 301,6
-4	1,6	-4,5	-10,5	-16,6	-22,6	-28,7	-43,8	-58,9	-74,0
-6	1,5	-1,1	-3,8	-6,4	-9,1	-11,8	-18,4	-25,1	-31,8
-8	1,5	1,4	-0,8	-2,0	-3,1	-4,3	-7,3	-10,2	-13,1
-10	1,5	0,7	-0,1	-0,9	-1,7	-2,5	-4,6	-6,7	-8,7
-12	1,5	1,0	0,4	-0,3	-0,9	-1,5	-1,0	-4,5	-6,0
-14	1,5	1,1	0,6	0,2	-0,3	-0,8	-1,9	-3,1	-4,2
-16	1,5	1,2	0,8	0,5	0,1	-0,3	-1,2	-2,1	-3,0
-18	1,5	1,3	1,0	0,7	0,4	0,1	-0,7	-1,4	-2,1
-20	1,4	1,3	1,1	0,8	0,6	0,3	-0,2	-0,9	-1,5
-22	1,4	1,4	1,2	1,0	0,8	0,5	0,0	-0,5	-1,0
-24	1,4	1,0	0,4	-0,2	-0,8	-1,4	-2,9	-4,4	-5,9
-26	1,4	1,2	1,0	0,6	0,3	0,0	-0,7	-1,5	-2,3
-28	1,4	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6	0,2	-0,3	-0,8
-30	1,4	1,4	1,3	1,2	1,1	0,9	0,6	0,3	0,0

Все исследователи выражают мнение, что теплоемкость снега определяется только теплоемкостью ледяных зерен, которую можно рассчитать по формулам (6.2) или (6.3). Теплоемкостью содержащихся в снеге воздуха и водяного пара обычно пренебрегают (табл. 6.8).

Таблица 6.8

Плотность и теплоемкость компонентов снега при 0 °С

Компоненты снега	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость единицы объема, Дж/м ³ ·К
Ледяные зерна	917	1,94·10 ⁶
Воздух	1,293	1,3·10 ³
Водяной пар	0,00493	9,9

Мокрый снег имеет температуру 0 °С, при понижении температуры содержащаяся в снеге вода замерзает. Поэтому теплоемкость мокрого снега включает теплоемкость ледяного скелета и скрытую теплоту замерзания воды.

Скрытая теплота плавления сухого снега равна скрытой теплоте плавления льда $L = 333$ кДж/кг. Соответственно количество тепла, необходимого для таяния единицы объема снега, будет:

- для сухого снега $Q = \rho L$;
- для мокрого снега $Q = \rho' L(1 - w)$,

где ρ, ρ' – плотности сухого и мокрого снега соответственно.

В снежном покрове часто наблюдается явление сублимации (возгонки), т.е. фазовый переход льда сразу в парообразное состояние. Скрытая теплота сублимации определяется суммой затрат тепла, требуемого для таяния льда и испарения воды. Скрытая теплота испарения воды может быть рассчитана по формуле

$$L_w = 2500 - 2,4T,$$

где T – температура испаряющейся воды, °С.

Теплопроводность снега не известна с такой точностью, как другие его теплофизические характеристики. Она обычно измеряется как коэффициент пропорциональности в одномерном уравнении теплопроводности Фурье:

$$q = -\lambda_{ef} \frac{dT}{dz},$$

где q – тепловой поток через единицу площади; $\frac{dT}{dz}$ – температурный градиент; λ_{ef} – эффективный коэффициент теплопроводности, учитывающий передачу тепла по ледяным зернам и по воздушным полостям.

Принято считать, что наибольшее влияние на величину эффективного коэффициента теплопроводности снега оказывает его плотность. На рис. 6.3 приведены результаты измерений эффективного коэффициента теплопроводности снега от его плотности и температуры, полученные в Якутске. Ниже приводится эмпирическая формула Андерсона, описывающая зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от плотности снега:

$$\lambda_{ef} = 2,09 \cdot 10^{-5} + 2,5 \cdot 10^{-9} \rho^2, \text{ кВт/кг.}$$

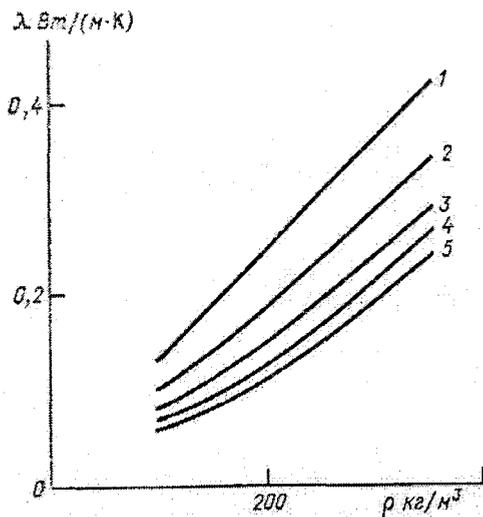


Рис. 6.3. Зависимость λ_{ef} от плотности и температуры:
 1 – $T > 2,5^{\circ}\text{C}$; 2 – $-2,5^{\circ}\text{C} > T > -7,5^{\circ}\text{C}$; 3 – $-7,5^{\circ}\text{C} > T > -15^{\circ}\text{C}$;
 4 – $-15^{\circ}\text{C} > T > -25^{\circ}\text{C}$; 5 – $T < -25^{\circ}\text{C}$.

Во многих ледотехнических расчетах необходимо учитывать поступающую в лед и снег и излучаемую ими лучистую энергию. Учет лучистой энергии в тепловом балансе необходим при изучении термической устойчивости инженерных сооружений, созданных из льда и снега, при решении экологических задач, например, при изучении миграции нефти сквозь лед и во многих других случаях. В соответствии со сказанным наибольший интерес для ледотехники представляют радиационные характеристики льда и снега, описывающие поглощение и излучение энергии.

Способность различных видов льда и снега поглощать лучистую энергию иллюстрирует табл. 6.9, содержащая данные лабораторного эксперимента. Из таблицы следует, что лучше всего поглощают лучистую энергию морской лед и снег. Увеличению поглощающей способности морского льда способствует наличие рассола.

Таблица 6.9

Проницаемость лучистой энергии через разные льды и снег

Толщина слоя, через который прошла энергия, см	Количество лучистой энергии, прошедшей через образцы, %				
	Речной лед	Озерный лед	Морской лед	Искусственно намороженный пресный лед	Снег
2	0,8	0,8	0,8 – 2,0	1,4	1,4 – 1,7
10	0,257	0,346	0,086	0,225	0,002

Характеристикой поглощательной способности ледяного тела по отношению к лучистой энергии является коэффициент β , который определяет степень затухания луча при прохождении слоя единичной толщины.

$$\beta = \frac{\ln \frac{(1-R)I_0}{I_l}}{l},$$

где I_0 – интенсивность падающего луча; I_l – интенсивность луча, прошедшего слой толщиной l ; R – часть интенсивности луча, отражаемая от верхней поверхности. Измерения показывают, что величина коэффициента β зависит от вида льда и длины волны (табл. 6.10).

Количество лучистой энергии, поглощенной льдом и преобразованной в тепло ΔQ , определяется по формуле

$$\Delta Q = I_0 \frac{r_0^2}{(r_0 + n)^2} \{[\exp - \beta(n - 1)] - \exp \beta n\},$$

где ΔQ – количество тепла, поглощенное в объеме, равном 1 см^3 , образованном телесным углом в 1 ср, отстоящим на n см от облучаемой поверхности образца; r_0 – расстояние от источника излучения до поверхности образца; I_0 – вошедшая в лед энергия.

Таблица 6.10

Коэффициент поглощения белого света и избирательного поглощения отдельных участков спектра для разных видов льда и снега

Виды льдов и снега	Длины волн, мк	β , см^{-1}
Сухой снег	Белый луч (без фильтра)	0,080
	370	0,081
	650	0,092
	470; 2600	0,123
Озерный лед	Белый луч (без фильтра)	0,008
	370	0,008
	650	0,010
	470; 2600	0,016
Искусственно замороженный лед	Белый луч (без фильтра)	0,018
	370	0,015
	650	0,018
	470; 2600	0,017
Речной лед	Белый луч (без фильтра)	0,011
	370	0,009
	650	0,011
	470; 2600	0,013
Морской лед	Белый луч (без фильтра)	0,032
	370	0,034
	650	0,034
	470; 2600	0,046

На рис. 6.4 показана поглощаемая различными видами льда лучистая энергия.

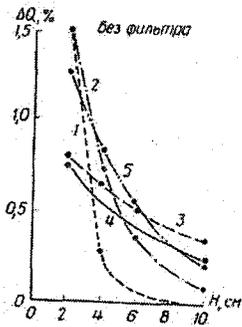


Рис. 6.4. Поглощение лучистой энергии различными видами льда:

1 – снег; 2 – морской лед; 3 – озерный лед; 4 – речной лед; 5 – искусственный лед.

Тепловое излучение ледяного покрова I_l в соответствии с законом Стефана-Больцмана определяется абсолютной температурой его поверхности T :

$$I_l = K(1 - A)T_l^4,$$

где K – постоянная Стефана-Больцмана; A – альbedo длинноволновой радиации.

6.3. Механические свойства

Ранее в курсе мы рассмотрели основные характеристики, которые используются для описания механических свойств материалов. Было показано, что для пластичных материалов применяется несколько различных механических характеристик (предел пропорциональности, упругости, текучести и т.д.). Для хрупких же материалов используется только понятие предела прочности.

Несмотря на то что температура льда обычно находится вблизи от точки плавления, в большинстве интересных для практики случаях он проявляет хрупкие свойства. Поэтому при описании его прочностных свойств используют в основном только предел прочности. Этот предел определяют для разных видов деформации. В соответствии с этим установлены следующие его разновидности:

- предел прочности на растяжение σ_p ;
- предел прочности на изгиб σ_f ;
- предел прочности на срез/сдвиг σ_τ ;
- предел прочности на сжатие σ_c ;
- предел прочности при стесненном сжатии $\bar{\sigma}_c$.

Рассмотрим эти характеристики более подробно, сразу же обращая внимание на методы их определения, при этом предпочтение будет отдаваться методам, одобренным специальной группой экспертов секции ледовых проблем Международной ассоциации гидравлических исследований (МАГИ).

Прочность на растяжение льда определяется в экспериментах двух типов: ледяные образцы гантелевидной формы растягиваются до разрушения с помощью стандартных испытательных машин и ледяные полые цилиндры сжимаются по диаметру к центру (рис. 6.5). Последний способ был разработан для испытаний бетона, а затем применен ко льду.

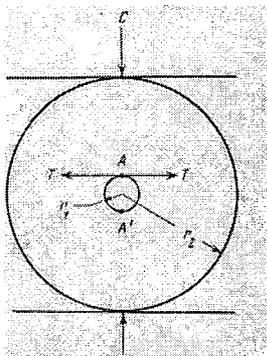


Рис. 6.5. Схема испытаний при определении прочности льда на растяжение: C – сжимающее цилиндр усилие; T – растягивающие усилия.

Группой экспертов МАГИ рекомендован первый способ проведения испытаний. Для этого используются ледяные образцы в виде гантелей. Такие образцы могут быть легко получены из кернов. Общая длина образцов должна составлять не менее трех диаметров керна, с тем чтобы длина рабочей части была не менее диаметра керна. Диаметр образца в районе испытываемого сечения должен находиться в диапазоне 0,5 – 1 диаметра керна. Переходная часть между рабочей частью и концами должна выполняться

в виде закруглений с радиусом, равным диаметру зерна. Тогда концентрация напряжений в переходной части будет минимальна.

На величину временного сопротивления растяжению большое влияние оказывают структурные неоднородности и различные включения, создающие концентраторы напряжений, которые и становятся очагами разрушения. Это необходимо учитывать при подборе материала и разработке метода приготовления образцов. Образцы следует испытывать при относительно высоких скоростях нагружения.

Величина предела прочности в этом случае определяется по стандартной формуле

$$\sigma_p = \frac{P}{S_p},$$

где P – разрушающее усилие; S_p – площадь сечения образца после разрушения.

Некоторые обобщенные результаты измерений предела прочности льда на растяжение представлены в табл. 6.11.

Таблица 6.11

Прочность льда на растяжение в зависимости от температуры

Тип льда	Диапазон температуры, °С	Прочность, МПа
Пресноводный	0 ... -10	0,9 – 1,2
	-10 ... -20	1,2 – 1,5
	-20 ... -35	1,4 – 1,8
Морской	0 ... -10	0,6 – 1,1
	-10 ... -20	1,4 – 1,8

Вторым методом получены данные о влиянии объема рассола на предел прочности при растяжении. Для получения этих данных испытано 1400 образцов. В результате получено следующее эмпирическое соотношение:

$$\sigma_p = 2.85 \left[1 - \left(\frac{V_p}{0.234} \right)^{0.5} \right],$$

где σ_p – в МПа; V_p – объем рассола.

При рассмотрении прочности снега на растяжение, как, впрочем, и других видов прочности, необходимо учитывать особенности структуры ледяной матрицы. Ее влияние можно описать с помощью следующего соотношения:

$$\sigma_* = \Phi(S)\sigma_{i*},$$

где σ_* – некоторый предел прочности снега; σ_{i*} – прочность ледяных связей между зернами; S – удельная поверхность контактов между зернами или относительная потенциальная поверхность разрушения; $\Phi(S) = \beta S$ – функция, определяемая геометрией структурной матрицы кристаллов льда; β – некоторая константа.

Существует эмпирическая формула для нахождения удельной поверхности контактов:

$$S = D^{-1} \left(\frac{\rho}{\rho_l} \right)^2,$$

где ρ, ρ_l – плотности снега и льда соответственно; D – размер зерна.

Более сложные модели описания структуры зернистого снега требуют измерений большего числа параметров. Для нахождения относительной контактной поверхности S_{ko} , характеризующей отношение суммарной площади сечений связей к единице площади потенциальной поверхности разрушения, требуется задание семи параметров.

$$S_{ko} = \chi \frac{dL^2}{D^3} n \frac{\rho}{\rho_l},$$

где n – координационное число; χ – параметр, учитывающий упаковку зерен и изменяющийся от 0,65 при $n = 3$ до 1,0 при $n \geq 6$; D, d – диаметры зерна и связи соответственно; L – характерное расстояние между центрами зерен.

Зависимость прочности снега на разрыв от относительной контактной поверхности показан на рис. 6.6, а на рис. 6.7 показана зависимость прочности от размера зерна и температуры. Плотность и структура снега обычно довольно жестко связаны, поэтому увеличение плотности вызывает увеличение относительной по-

верхности контактов. Если же сравнивать снег с одинаковой плотностью, но различной структурой, то наибольшей прочностью при растяжении обладает мелкозернистый снег, а наименьшей – крупнозернистый. Увлажнение снега приводит к заметному снижению прочности на разрыв всех типов снега.

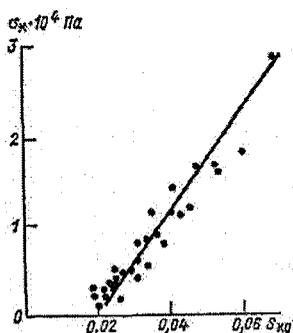


Рис. 6.6. Зависимость прочности снега на разрыв от относительной контактной поверхности:
 $-3^{\circ}\text{C} < T < -1^{\circ}\text{C}$.

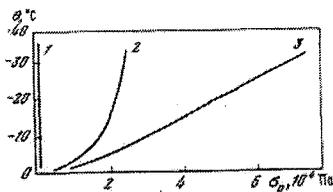


Рис. 6.7. Изменение сопротивления снега разрыву в зависимости от температуры для снега различной структуры: 1 – крупнозернистый снег $D > 2$ мм, $\rho = 420 \text{ кг/м}^3$; 2 – снег с $D \approx 2$ мм, $\rho = 480 \text{ кг/м}^3$; 3 – мелкозернистый снег $D < 0,6$ мм, $\rho = 390 \text{ кг/м}^3$.

Одной из наиболее важных характеристик льда является его *прочность на изгиб*. Важность этой характеристики объясняется тем, что во многих практических случаях лед испытывает изгибные деформации.

Для определения предела прочности льда на изгиб в настоящее время наиболее часто используются три метода:

- разрушение балок, лежащих на опорах;
- разрушение консолей, выпиленных из не разрушенного ледяного покрова;
- разрушение круглой, свободно лежащей на кольцевой опоре выпиленной из керна ледяной пластины, нагружаемой в центре.

Первый и третий методы в основном используются при проведении полевых испытаний, второй – в ледовых бассейнах. Однако в последнее время все чаще второй способ стали применять и при полевых исследованиях, хотя для этого требуются специальные довольно массивные приспособления.

При использовании первого метода из ледяного покрова с различных его горизонтов выпиливаются призматические образцы, которые устанавливаются на двух опорах и нагружаются в центре усилием. Прочность льда на изгиб рассчитывается по известной формуле

$$\sigma_f = \frac{3Pl}{2bh^2},$$

где P – разрушающее усилие; l – расстояние между опорами; b – ширина балки; h – толщина (высота) балки.

Требуемые правилами проведения эксперимента соотношения между геометрическими характеристиками образцов приведены в табл. 6.12.

Таблица 6.12

Соотношение между геометрическими характеристиками балок

l , см	$b = h$, см
36	4
44	5
52	6
60	7
72	8
86 – 90	11 – 12

Одним из основных недостатков первого способа является необходимость извлечения образца из ледяного покрова. За время, проходящее с момента извлечения образца из ледяного покрова и его испытанием на прочность (до нескольких часов) с образцом могут произойти изменения. В первую очередь это касается температуры образца и его солёности. Из нарушенных пор и каналов может вытечь значительное количество рассола, особенно если проводятся исследования молодых еще не распрепленных льдов. Вместо рассола в порах образца будет находиться воздух, а из механики разрушения известно, что деформируемые и недеформируемые включения по-разному влияют на развитие процесса разрушения.

При испытаниях первым методом получают прочность льда на изгиб, которую относят к соответствующему горизонту по толщине льда. Однако он не дает возможности получить данные о прочности ледяного покрова в целом.

Желание устранить указанные выше недостатки привело к созданию второго метода определения предела прочности льда на изгиб. Для его реализации из ледяного покрова выпиливается консольная балка, которая до разрушения не извлекается из среды. Эта балка нагружается на конце силой, предел прочности рассчитывается по формуле

$$\sigma_f = \frac{6Pl}{bh^2}.$$

При проведении таких испытаний предполагается, что заделка консольной балки жесткая, т.е. не существует прогибов и углов поворота, кроме того, считается, что увеличивающаяся при погружении балки под воду сила плавучести не оказывает влияния на результат. По рекомендации МАГИ размеры балок необходимо выбирать в зависимости от их толщины. Длина балки должна лежать в диапазоне $l = 7-10h$, а ширина $b = 1-2h$. Такой выбор размеров снижает влияние сдвигов на результаты. Скорость возрастания нагрузки должна выбираться таким образом, чтобы от начала процесса нагружения до разрушения балки проходило не более 1-2 с.

Одним из недостатков метода является возможность образования концентраторов напряжения в точках притыкания консоли к ледяному покрову. Специалисты МАГИ рекомендуют делать в этом месте закругление радиусом, превышающим 1/15 ширины балки.

Третий способ широко распространен благодаря простоте получения образцов льда при проведении полевых исследований. Цилиндрические керны льда добываются ручным или механическим кольцевым буром, остается только напилить их на отдельные пластинки. Предел прочности рассчитывается по формуле

$$\sigma_f = \frac{3P}{2\pi mh^2} \left[m + (m+1) \ln \frac{r}{r_0} - (m-1) \frac{r_0}{4r^2} \right],$$

где m – величина обратная коэффициенту Пуассона; h – толщина пластины; r – внутренний радиус кольцевой опоры; r_0 – радиус распределения нагрузки.

Недостатки третьего метода такие же, как и у первого.

Прочность пресноводного льда на изгиб превышает прочность морского льда. Так при испытании свободно опертых балочек, полученных из озерного льда, среднее значение прочности составило 1,8 МПа, при этом наблюдался большой разброс результатов (от 0,15 до 4,0 МПа). Однако следует учесть, что изгибная прочность, определенная на малых образцах, значительно превосходит прочность, найденную при испытании консольных балок. При испытании в тех же условиях консольных балок было получено среднее значение прочности на изгиб, равное 0,42 МПа со стандартным отклонением 0,15 МПа. Среднее значение изгибной прочности речного льда, полученное при испытаниях консолей, составляет 0,56 МПа.

Прочность морского льда на изгиб существенным образом зависит от ориентации оптических осей кристаллов и от содержания жидкой фазы. При действии изгибающего усилия параллельно оптическим осям предельная прочность находилась в пределах 2,0 – 3,0 МПа, а при действии перпендикулярно осям прочность уменьшалась до 0,5 – 1,0 МПа. Экспериментами установлено, что зависимость прочности льда от объема рассола V_p подчиняется следующему выражению:

$$\sigma_f = 0,7 \left(1 - \sqrt{\frac{V_p}{0,202}} \right).$$

Рис. 6.8 дает представление о диапазоне изменчивости изгибной прочности льда по данным различных авторов, исследовавших влияние объема рассола на прочностные характеристики льда.

Снежный покров не изгиб обычно не испытывается.

В настоящее время не существует общепринятой методики проведения испытаний по определению прочности льда на сдвиг. Специалисты МАГИ рекомендаций по сдвиговым испытаниям не приводят. Это связано с большими трудностями создания во льду напряжений чистого сдвига. Поэтому немногочисленные испытания на сдвиг обычно отражают смешанный режим напряжений во льду. Полученные результаты часто называют пределом прочности льда на срез.

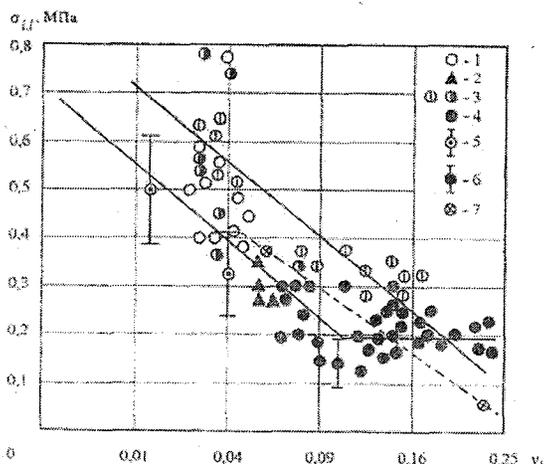


Рис. 6.8 Прочность льда на изгиб в зависимости от содержания рассола по данным различных авторов: 1 – В. Уикс и Д. Андерсон; 2 – Д. Браун; 3 – К. Вздур; 4 – Т.К. Бутковича; 5 – С.А. Вершинина; 6 – Т. Табаты; 7 – В.П. Гаврило.

Наиболее близкое к сдвигу напряженное состояние возникает при кручении ледяных цилиндров. По результатам этих испытаний можно определить величину временного сопротивления сдвигу σ_{τ} и модуль сдвига G . Они рассчитываются по следующим формулам:

$$\sigma_{\tau} = \frac{16M}{\pi d^3};$$

$$G = \frac{Ml}{\varphi I_p},$$

где M – наибольший крутящий момент; d – диаметр образца; l – расстояние между сечениями, на котором измерялся угол закручивания φ ; I_p – полярный момент инерции сечения.

Прочность льда на срез определяют также продавливанием пластины льда с помощью центрального пуансона и при сдвиге двух половинок призматического образца относительно друг друга. В обоих случаях прочность льда на срез определяют по формуле

$$\sigma_{\tau} = \frac{P}{F}, \quad (6.9)$$

где P – разрушающее усилие; F – площадь поверхности среза.

По данным измерений различных исследователей прочность пресноводных льдов на срез варьируется в пределах от 0,25 до 3,5 МПа. Предел прочности пресноводного льда на срез не имеет ярко выраженной зависимости от температуры. У морского льда эта зависимость более явная, что, по-видимому, объясняется изменением объема жидкой фазы при изменении температуры. В табл. 6.13 приведены данные И.Г. Петрова, иллюстрирующие прочность морского льда на срез.

Таблица 6.13

Предел прочности морского льда на срез

Характеристика	Однолетний арктический лед		Многолетний арктический лед		
	-10...-15 °С	-15...-20 °С	0...-5 °С	-5...-10 °С	-15...-20 °С
Среднее значение, МПа	0,54	0,76	0,27	0,18	1,03
Экстремальное значение, МПа	0,11 – 1,56	0,49 – 1,27	0,23 – 0,31	0,10 – 0,26	0,8 – 1,20

Предельное сопротивление снега сдвигу определяется силами сцепления между зернами и силами внутреннего трения, которые зависят от плотности, строения и температуры снега. Экспериментальные исследования показывают, что сопротивление снега плоскостному сдвигу при быстром нагружении σ_{τ} может быть описано формулой

$$\sigma_{\tau} = C + p \operatorname{tg} \phi,$$

где C – сопротивление снега быстрому сдвигу при отсутствии напряжений сжатия, которое условно называется сцеплением; p – нормальное давление; $\operatorname{tg} \phi$ – коэффициент внутреннего трения.

Параметры C и $\operatorname{tg} \phi$ определяются на основании полевых или лабораторных экспериментов. Схемы упрощенных испытаний снега на сдвиг представлены на рис. 6.9. Такие испытания могут проводиться в стенке шурфа с помощью сдвиговой рамки (а) или при продавливании слоя снега с образованием двойного среза.

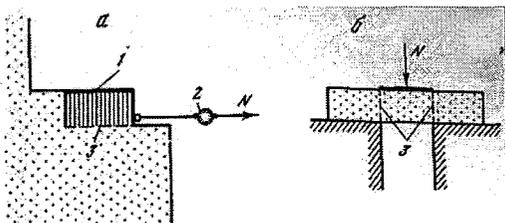


Рис. 6.9. Схемы упрощенных испытаний снега на сдвиг: 1 – сдвиговая рамка; 2 – диаметрмер; 3 – плоскость среза.

Сопротивление снега сдвигу при проведении испытаний по схеме (а) определяют по величине усилия, требующегося для среза снега:

$$\sigma_{\tau} = \frac{N}{F},$$

где N – срезающее усилие; F – площадь среза, равная площади рамки. Затем рамка со снегом взвешивается, после чего ее вновь устанавливают на первоначальное место и определяют сопротивление сдвигу как силу \bar{N} , требуемую для повторного сдвига рамки со снегом.

По полученным данным определяют искомые параметры:

$$C = \frac{N - \bar{N}}{F}; \quad \operatorname{tg} \phi = \frac{\bar{N}}{G},$$

где G – вес снега.

На рис. 6.10 приведены пределы изменения величины сопротивления сухого снега быстрому сдвигу при малых значениях давления, т.е. в условиях, когда $\sigma_{\tau} \approx C$. Из этого графика следует, что величина сопротивления сдвигу в зависимости от плотности снега может изменяться на четыре порядка.

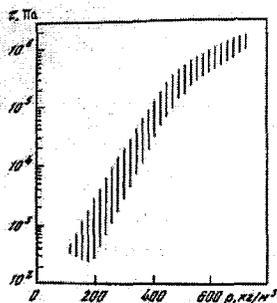


Рис. 6.10. Зависимость сопротивления сухого снега от плотности. Заштрихованная площадь – область разброса экспериментальных точек.

Прочность льда на сжатие σ_c , под которой обычно понимают предел прочности при одноосном нагружении, определяют при разрушении прессом кубиков льда. Вычисления проводят по формуле (6.9), в которой F в данном случае представляет площадь поперечного сечения образца. На величину предела прочности на сжатие оказывают влияние следующие факторы: направление приложения нагрузки по отношению к направлению роста кристаллов; кристаллическая структура образца; скорость изменения нагрузки. По разным источникам данные систематизированные. Среднее значение прочности льда на сжатие составляет $5,2 \pm 1,2$ МПа, при этом общий разброс данных очень большой – от 0,4 до 12,0 МПа.

В практических приложениях прочность льда на сжатие практически не используется, так как лед никогда не испытывает деформаций одноосного сжатия. При сжимающих нагрузках во льду возникает сложное напряженное состояние. Для его описания вводится некоторая условная величина, называемая пределом прочности на смятие (стесненное сжатие). Определяя прочность на смятие, применяются как эмпирические формулы, так и специальные экспериментальные методики.

Известный российский исследователь К.Н. Коржавин считает, что для получения значений, характеризующих смятие, прочность на сжатие должна быть увеличена в 2,5 – 2,7 раз.

В ледовых бассейнах, а иногда и в натуральных условиях, прочность льда на смятие определяют путем протаскивания цилиндра сквозь ледяной покров. При таких испытаниях в первом приближении прочность льда на смятие вычисляется по формуле

$$\bar{\sigma}_c = \frac{P}{dh},$$

где P – среднее усилие, воспринимаемое цилиндром; d – диаметр цилиндра; h – толщина ледяного покрова.

Исследования прочности снега на сжатие показали, что она в несколько раз превышает прочность при растяжении. Прочность на сжатие возрастает вместе с увеличением плотности снега. При повышении температуры и увеличении размера зерна прочность

снега на сжатие уменьшается. При постоянных температуре и плотности наибольшей прочностью на сжатие обладает мелкозернистый снег.

К механическим характеристикам льда относятся его *модули упругости и коэффициент Пуассона*. Для определения модуля Юнга и модуля сдвига применяются статические и динамические методы. Модуль Юнга в статических методах определяется путем измерения прогиба балок, консолей или ледяных пластин под фиксированной нагрузкой. Динамические методы основаны на измерении продольных и поперечных упругих колебаний образцов льда. Эти методы не отличаются от описанных в первой части пособия и здесь подробно рассматриваться не будут.

На величину модулей упругости оказывает влияние температура. Для пресноводного столбчато-гранулированного льда при действии нагрузки поперек длинных осей кристаллов получено следующее эмпирическое выражение для диапазона температур от -3 до -40 °C:

$$E = (5,69 - 0,0648T) 10^3.$$

Для определения модуля Юнга морского льда при различных температуре и солености получены следующие эмпирические соотношения:

В.П. Берденниковым:

$$E_0 = (87,6 - 0,21T - 0,0017T^2) 10^8;$$

$$E = E_0 \left(1 - 3 \frac{S}{S_p} \right),$$

где E_0 – модуль упругости пресноводного льда; T – температура льда, °C; S – соленость льда, ‰; S_p – соленость рассола при данной температуре, ‰;

Паундера и Ланглебена:

$$E = (10,00 - 0,0351S) 10^9;$$

Табатой:

$$E = (32,3\rho - 20,7 + 0,14T - 0,59e^{-0,129T}) 10^9,$$

где $\rho = \rho_0(1 - S)$, здесь ρ_0 – плотность чистого льда; S – соленость льда.

Зависимость модуля Юнга морского льда от объема рассола была экстраполирована Хутгером следующим образом:

$$\frac{E}{E_0} = \begin{cases} 1 - 5V_p, & 0 \leq V_p \leq 0,15 \\ 47,168(0,15 - V_p)^3 - 45,97(0,15 - V_p)^2 + 0,5(0,15 - V_p) + 0,25 & 0,15 \leq V_p \leq 0,4, \\ 0,06(1 - V_p) & 0,4 \leq V_p \leq 1,0 \end{cases}$$

здесь $E_0 = 9,21(1 - 0,00146T)$, ГПа – модуль Юнга чистого льда как функция температуры T .

Средние значения модуля сдвига морского льда лежат в пределах $G = (3 - 3,8) 10^6$ кПа.

Величина коэффициента Пуассона достаточно стабильна для льда. Для практических расчетов можно использовать предложенную Уиксом и Ассуром формулу:

$$\nu = 0,333 + 0,06105 \exp\left(\frac{T}{5,48}\right).$$

Японскими исследователями Найкая и Куроива установлена эмпирическая зависимость между модулем упругости снега и его плотностью в диапазоне изменения плотности от 250 до 500 кг/м³

$$\lg E = 5,8 + 0,00635\rho.$$

В этой формуле E измеряется в Па, плотность – в кг/м³.

В последнее время большой интерес проявляется к исследованию *трещиностойкости льда*. Для проведения таких испытаний используется схема либо трехточечного, либо четырехточечного изгиба выпиленных из ледяного покрова балок. В отношении этих методов можно высказать те же критические замечания, которые были сделаны при рассмотрении методов определения предела прочности льда на изгиб (первый и третий способ).

Для преодоления этих недостатков специалистами ИПМ РАН и ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова был разработан и исследован в ледовом опытовом бассейне метод определения трещиностойкости льда при испытании консольной балки, выпиленной из нераз-

рушенного ледяного покрова. На рис. 6.11 представлена схема реализации такого способа. В этом случае коэффициент интенсивности напряжений рассчитывается по формуле

$$K_{IC} = \frac{2PL\sqrt{\pi}}{h(w-a)^{1.5}}, \quad 0,2 < \frac{a}{w} < 0,9, \quad \frac{L}{w} > 2,$$

где L – длина балки; w – ширина балки; a – величина надреза в корневом сечении балки; P – разрушающая нагрузка.

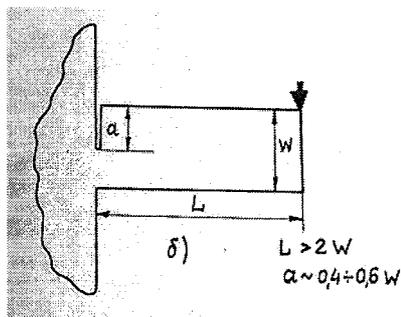


Рис. 6.11. Схема испытания на трещиностойкость консольных образцов.

Этим способом была измерена трещиностойкость моделированного столбчатого льда. Испытания трещиностойкости проводились при температуре воздуха в бассейне -10°C , прочность льда на изгиб составляла 70 кПа, соленость льда 3 – 4 %. Моделированный лед имел двухслойное строение, причем структуру верхнего слоя составляли мелкие кристаллы льда, а нижний слой имел столбчато-зернистое строение с поперечными размерами кристаллов 1 – 3 мм. Общая толщина ледяного покрова составляла 48 – 50 мм. Образцы выпиливались из ледяного покрова пилой, а иницирующий надрез осуществлялся ножовочным полотном толщиной 2 мм. Результаты экспериментов представлены в табл. 6.14.

По различным литературным источникам в среднем для пресноводного льда трещиностойкость составляет $K_{IC} = 80 \dots 200 \text{ кН/м}^{1,5}$, а для морского льда – $K_{IC} = 50 \dots 140 \text{ кН/м}^{1,5}$. К уменьшению коэффициента интенсивности напряжений льда приводит увеличение

скорости нагружения (\dot{K}_{IC}), возрастание температуры, уменьшение размеров кристаллов и повышение солености льда. Влияние перечисленных факторов отражает следующая эмпирическая зависимость:

$$K_{IC} = \exp \left[\frac{0,6 + 0,6 \lg(1 + V_p)}{\sqrt{d_{cr}}} \right] \left[50 \lg T + \frac{200}{1 + \sqrt{\lg(1 + \sqrt{V_p})}} \right] \dot{K}_{IC}^{-\left(0,0411 \lg T + \frac{0,06}{1 + V_p} \right)},$$

где d_{cr} – характерный размер кристалла льда.

Таблица 6.14

Результаты измерения трещиностойкости моделированного льда на консольных образцах

№ эксперимента	Толщина корки, мм	K_{IC} , кН/м ^{1,5}
1	12	18
2	5	7,6
3	5	7,2
4	5	6,8
5	5	5,4
6	5	9,0
7	5	7,8
8	7	11,5
9	7	13,6
10	7	14,6

Недавно стали проводиться эксперименты по определению трещиностойкости снега. Такая информация может быть использована при оперативном прогнозе схода снежных лавин. Среднее значение коэффициента интенсивности напряжений снега составляет $K_{IC} = 115$ кН/м^{1,5}.

При применении льда и снега в хозяйственной деятельности большое значение приобретают их *пластические свойства*. Под ними обычно понимают способность льда и снега необратимо деформироваться под действием внешних сил и внутренних напряжений. При рассмотрении пластических свойств льда различают вязкое течение льда и ползучесть льда. Фактически вязкое течение

является первым приближением к более сложному процессу ползучести льда.

Говоря о вязком течении льда, имеют в виду аналогию с течением ньютоновской вязкой жидкостью. При этом предполагают, что, как и в жидкости, скорость течения линейно зависит от давления, т.е. для льда должно выполняться соотношения типа

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta},$$

где $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации льда; η – коэффициент вязкости (внутреннего трения), Па·с.

Вязкое течение наблюдается при напряжениях меньше предела текучести и уменьшается при уменьшении напряжения. При снятии напряжений оно обращается в нуль. Для определения вязкости используют метод изгиба свободной балки, лежащей на двух опорах. В этом случае коэффициент вязкости определяется по формуле

$$\eta = \frac{Fl^3}{12bh^3u_p},$$

где F – усилие, которым нагружают балку; u_p – установившаяся скорость пластической деформации.

Также коэффициент вязкости может быть определен при растяжении (сжатии) стержня и чистом кручении стержня. В этих случаях вязкость определяется по формулам:

$$\eta = \frac{Fl}{Su_p};$$

$$\eta = \frac{2M}{\pi r^4 \dot{\varphi}},$$

где S – площадь поперечного сечения образца; r – радиус стержня; M – закручивающий момент; $\dot{\varphi}$ – скорость изменения угла закручивания.

В табл. 6.15 приведены некоторые результаты измерения коэффициента вязкости пресноводного льда.

Значения коэффициента вязкости пресноводного льда

Автор	Метод определения	Температура льда, °С	Вязкость, Па·с
Кобеко	Изгиб ледяного покрова	Около 0	$10^{12} \dots 10^{14}$
Лавров	Изгиб образцов	-3 ... -23	$2,6 \cdot 10^{13} \dots 6,9 \cdot 10^{13}$
Шульман	Растяжение образцов	0 ... -25	$10^{11} \dots 10^{13}$
Ханина и Шульман	Растяжение образцов	-1 ... -23	$10^{10} \dots 10^{13}$
Войтковский	Наблюдения за деформациями ледяных складов	0 ... -2	$1,6 \cdot 10^{13} \dots 3,3 \cdot 10^{13}$

Для морского льда имеются данные Ю.Л. Назинцева. Он изучал коэффициент вязкости при изгибе и кручении небольших образцов льда соленостью 0,2 – 1,0 ‰ (температура 0...–5 °С, напряжения, развиваемые нагрузкой 0...0,8 МПа). При изгибе были получены следующие значения $\eta = (1,24 \dots 5,28) 10^{13}$ Па·с, а при кручении $\eta = (1,20 \dots 1,72) 10^{12}$ Па·с.

Связь между скоростью деформаций и напряжениями описывается законом Глена:

$$\dot{\epsilon} = k\sigma^n,$$

где k – эмпирическая константа; n – показатель степени, изменяющийся в пределах от 1,85 до 4,16 при изменении напряжений от 0,1 до 1,5 МПа.

График изменения деформаций льда во времени при постоянных напряжениях представлен на рис. 6.12. Анализ кривых, приведенных на этом графике, свидетельствует о том, что процесс ползучести льда развивается по тем же законам, что и ползучесть других конструкционных материалов. Наибольший интерес представляет нижняя кривая, соответствующая напряжениям σ_{∞} , которые К.Ф. Войтковский назвал пределом длительной ползучести. При напряжениях, не превышающих этот предел, пластическая деформация будет возрастать непрерывно с постоянной скоростью. Именно этот режим и может быть описан с помощью рассмотренного выше коэффициента вязкости.

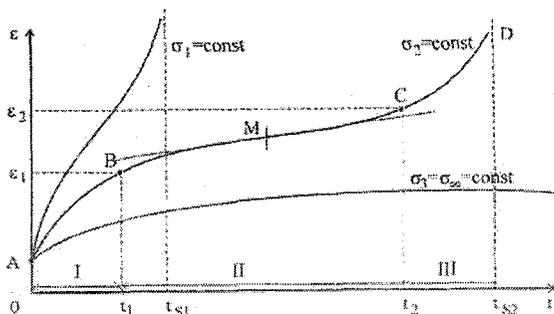


Рис. 6.12. Кривые ползучести льда.

7. Искусственный лед и снег

7.1. Получение гранулированного льда

Широкое использование льда и снега как строительного материала сдерживалось необходимостью их добычи и транспортировки к месту строительства. Для преодоления этой трудности было предложено много способов получения искусственного льда. В практических применениях использовались три основных метода его получения, которые различаются способами намораживания льда — послойное и смешанное намораживание, намораживание с использованием ледяных блоков. Послойное намораживание заключается в послойном налив тонких слоев воды с последующим их промерзанием в холодном зимнем воздухе. При смешанном намораживании для ускорения процесса замерзания на поверхность замораживания выкладывают куски льда, которые специально для этого заготавливаются. Для использования третьего способа сооружение изготавливают из заранее приготовленных блоков льда, при этом швы между блоками заполняют снегом, который затем смачивается водой.

Наибольшее распространение ввиду его простоты и дешевизны получил способ послойного намораживания льда. Этот способ достаточно хорошо исследован. Была получена теоретическая зависимость времени промерзания слоя воды от толщины слоя и гидрометеорологических факторов.

$$\tau = \frac{73400\delta + R_{\Sigma} + R}{\alpha[2,6(p_1 + \varphi p) - t_a]},$$

где δ – толщина слоя воды; R_{Σ} – суммарная солнечная радиация, поглощаемая замерзающим слоем; R – эффективное излучение; α – коэффициент теплоотдачи между замерзающим слоем и окружающим воздухом; p_1 – упругость насыщенных водяных паров на поверхности замерзающего слоя; φ – относительная влажность воздуха; p – упругость насыщенных водяных паров в воздухе; t_a – температура воздуха.

В настоящее время задача получения искусственного льда и снега на месте практически решена благодаря разработке методов и устройств для получения гранулированного льда (искусственного снега) и других типов льда рыхлой структуры.

В естественных условиях лед рыхлой структуры – снег получается в результате выполнения следующей цепочки фазовых превращений воды: жидкость (раствор) → пар и тонкодисперсный гомофазный аэрозоль (туман) → гетерофазный монодисперсный и поли дисперсный аэрозоль (облака) → гетерогенный полидисперсный твердый аэрозоль (атмосферный лед) → снег приземный. Выполненные исследования показали, что попытка искусственного воспроизведения этой цепочки требует создания длительно существующих туманов с переменной влажностью, что для практических целей экономически невыгодно. Для искусственного воспроизводства более приемлемы другие естественные процессы ледообразования, например, образование акреационного льда и наледей. Акреационный лед получается в результате кристаллизации оседающей на поверхности капельно-жидкой влаги. Наледи образуются при замерзании воды, попавшей на поверхность.

Установлено, что с помощью акреационного ледообразования можно формировать ледяные структуры с плотностью до 50 – 100 кг/м³. Однако такие структуры формируются при вполне определенных условиях. Так, скорость соударения переохлажденной капли с поверхностью не должна быть очень большой, чтобы капля сильно не деформировалась и не растекалась. Другими словами,

осевшая на поверхность капля должна сохранить свою форму. В этом случае капли могут смерзаться друг с другом, образуя причудливые структуры. В естественных условиях по такому сценарию происходит формирование изморози. Если же капля деформируется и растекается по поверхности, то возникает ледяной покров достаточно высокой плотности. Плотность обычных наледей составляет примерно 900 кг/м^3 , однако если намораживать водно-воздушную пену, то можно получить лед с любой заданной плотностью.

Искусственный лед рыхлой структуры по способу получения разделяют на три типа: пористый (пенолед), гранулированный и азрированный гранулированный (рис. 7.1)

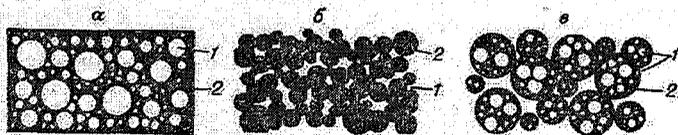


Рис. 7.1. Типы искусственного рыхлого льда: *a* – пористый (пенолед); *б* – гранулированный; *в* – азрированный гранулированный; 1 – воздух; 2 – лед.

Гранулированный лед получают при диспергировании воды в охлажденный до отрицательных температур воздух. Плотность получаемого при этом гранулированного льда как двухфазной системы будет определяться из соотношения

$$\rho_{GI} = (1 - n)\rho_l, \quad (7.1)$$

где ρ_{GI} – плотность гранулированного льда; n – пористость системы.

Если капли воды во время полета замерзают в воздухе, то плотность гранулированного льда будет определяться способом укладки ледяных шариков. Теоретически диапазон изменения пористости составляет от $n_{\max} = 0,476$ для кубической упаковки до $n_{\min} = 0,259$ для тетраэдрической упаковки. В соответствии с формулой (7.1) плотность гранулированного льда будет изменяться от 480 кг/м^3 до 680 кг/м^3 . При нерегулярной укладке в режиме свободной засыпки наиболее вероятными значениями пористости являются $n = 0,33 \dots 0,39$, что не позволяет получить при падении от-

дельных гранул льда на горизонтальную поверхность покров с плотностью менее $480 - 500 \text{ кг/м}^3$.

Для получения особо рыхлого льда используются специальные методы, включающие применение поверхностно-активных веществ (ПАВ). Это методы формирования пенольда, когда на защищаемую поверхность слоями наносится водо-воздушная пена. Пена представляет собой дисперсную систему, состоящую из пузырьков воздуха, разделенных слоями жидкости. Одним из условий успешного намораживания защитных пен является правильный выбор высоты слоя пены h , который намораживается при единичном технологическом акте. Практика работы показывает, что равномерное нанесение слоя пены толщиной $< 50 \text{ мм}$ связано большими трудностями из-за значительной шероховатости поверхности намораживания. Удовлетворительные результаты получаются при толщине слоя, который обеспечивает полное его смерзание до того, как начнется процесс синерезиса. Так называется процесс истечения из пены жидкой фазы, что приводит к уменьшению толщины пленок жидкости, образующих пену и, в конечном счете, к разрушению ее при замораживании. В зависимости от концентрации ПАВ в растворе время начала синерезиса колеблется от 10 до 300 с.

Как показывают результаты экспериментальных и теоретических исследований, сформировать покров из пенольда путем намораживаний элементарных слоев пены до начала истечения из нее жидкости не удастся. Для интенсификации процесса замораживания пены применяют ее диспергирование в атмосферу при отрицательных температурах воздуха.

При замерзании пены ее ячеистая структура сохраняется. Однако перевод дисперсионной среды в твердое состояние еще не означает прекращение процесса ее разрушения, так как сохраняются термодинамические факторы, приводящие к неустойчивости системы и увеличению ее плотности из-за протекания процессов метаморфизма. Основным фактором, оказывающим влияние на метаморфизм пен, является водяной пар. Упругость водяного пара зависит от количества молекул воды, переходящих в газообразную среду с единицы поверхности. Применение ПАВ создает дополни-

тельное препятствие этому переходу. Эффективность различных ПАВ иллюстрируется в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Влияние различных ПАВ на устойчивость жидких и замороженных пен

ПАВ (концентрация раствора 0,2%)	Время полного разрушения пены	
	Жидкие, мин	Замороженные, сут.
Алкилсульфаты натрия	11,5	43
n-окиси триалкиламина	12,6	58
Алкансульфонаты натрия	19,5	73
Алкоксеметилметилдиметиаммоний (Алкомон ДС)	25,3	86
Снег без ПАВ	—	22

Исследования показали, что адсорбционный слой ПАВ лишь частично препятствует переходу молекул воды в пар. Для дальнейшего ослабления этого процесса применяют химические соединения, способные при отрицательных температурах образовывать жидкие пленки на поверхностях раздела, например, полиэтилгидросилоксаны (ГКЖ-94).

ПАВ применяются и при создании аэрированного гранулированного льда. Этот лед получают при диспергировании жидкости с ПАВ прямоструйными форсунками с использованием высокого перепада давления ($P > 5$ МПа). В этом случае естественной аэрации получают лед с плотностью 500 кг/м^3 . Если же при диспергировании в раствор ПАВ вводится дополнительно сжатый воздух, то его применение позволяет получить аэрированные гранулы льда с заданной плотностью.

Наибольшее использование в хозяйственной деятельности имеет гранулированный лед. Для его производства в настоящее время применяются четыре основных способа: способ гидравлического дальнеструйного факела, способ пневмогидравлического факела, вентиляционный и аэродинамический способы. Рассмотрим их более подробно.

Способ гидравлического дальнеструйного факела. Это наиболее простой способ получения гранулированного льда, основанный на механическом распылении воды прямоструйными соплами. Наилучшие результаты получаются при распылении воды че-

рез насадок диаметром 20 мм и давлении перед соплом 0,9 – 1,0 МПа. В этом случае формируются капли диаметром 0,1 – 2,8 мм. Увеличивая диаметр насадки, давление в струе снижается, что приводит к росту диаметра капель. При этом на поверхность выпадает "шуга" – влажный гранулированный лед. Более детальные исследования позволили установить, что способом гидравлического дальнеструйного факела можно получить сухой гранулированный лед при температуре воздуха не выше $-26 \dots -30$ °С. При использовании установок, основанных на этом методе, при температурах до -16 °С получают влажный гранулированный лед. Этот способ используется при устройстве ледяных переправ, строительстве взлетно-посадочных полос и т.п.

Способ пневмогидравлического факела. Этот способ позволяет получать гранулированный лед при температурах, близких к 0 °С. Эффективная работа при столь высоких температурах достигается за счет диспергирования воды сжатым воздухом. Замерзшие капли воды появляются благодаря резкому понижению температуры смеси из-за адиабатического расширения сжатого воздуха. В соответствии с законом Пуассона температура и давление сжатого воздуха до и после расширения связаны соотношением

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}},$$

где T_1, P_1 – исходные температура и давление сжатого воздуха; T_2, P_2 – температура и давление воздуха после расширения; $\gamma = c_p / c_v$ – показатель адиабаты, c_p, c_v – теплоемкости воздуха при постоянном давлении и объеме соответственно. При адиабатическом расширении в обычных условиях ($P_2 = 0,1$ МПа) сжатого воздуха ($\gamma = 1,4$), имевшего в начале $T_1 = 293$ °К, $P_1 = 0,5$ МПа, его температура после расширения составит -88 °С. При таком понижении температуры происходит спонтанная кристаллизация капель.

Предложено большое количество устройств для реализации получения искусственного снега способом пневмогидравлического факела. Наибольшее распространение получил распылитель типа конвергентное сопло внутреннего смешения (снежная пушка).

В этом устройстве находящиеся под давлением потоки воды и воздуха смешиваются в смесительной камере еще до выхода в атмосферу. На рис. 7.2 показаны характеристики работы снежной пушки в зависимости от величин давлений воды и воздуха, от отношения расходов воздуха и воды. Из рисунка следует, что в зависимости от параметров при работе снежной пушки можно получить очень влажный, влажный и сухой снег. Существуют такие предельные значения давления воздуха и воды, при которых искусственный снег вообще не может быть получен.

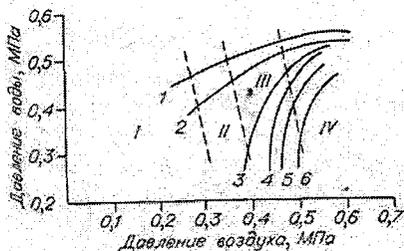


Рис. 7.2. Характеристика работы снежной пушки в диапазоне температур от -4 до -10°C : 1 – 6 – отношение расходов воздуха и воды, равное соответственно 124, 187, 311, 498, 560, 684, I – отсутствие снега; II – очень влажный снег; III – влажный снег, IV – сухой снег.

Помимо снежной пушки применяются и другие типы распылителей, такие как концентрическое сопло внешнего смешения и сопло внешнего смешения с пересекающимися потоками. В первом типе устройств воздух подается во внутреннее сопло, а вода во внешнее или наоборот. Смешение потоков происходит прямо в атмосфере. Основным недостатком этого устройства является его сильная чувствительность к внешним условиям, особенно к скорости ветра. Во втором типе устройств вода и воздух, подающиеся из различных сопел, образуют струи, которые затем пересекаются. Для каждого из этих устройств также существуют режимы работы, при которых снег (сухой или влажный) образуется или нет.

Вентиляционные способы. В настоящее время большое внимание уделяется вопросам снижения расхода сжатого воздуха и повышению производительности генераторов искусственного сне-

га. Эта задача решается путем диспергирования воды в сильные потоки холодного воздуха, которые могут создаваться турбиной или мощным вентилятором. Вентиляционный способ реализуется в двух типах устройств: вентиляционных гидропультах, в которых диспергирование воды осуществляется гидравлическими способами, и вентиляционных пневмогидропультах, в которых водный аэрозоль получают с помощью пневмогидравлических форсунок.

Типичный вид вентиляционного гидропульта показан на рис. 7.3. В этом устройстве распыление воды осуществляется воздушно-пенным стволом. Образованные таким способом воздушно-водяные струи захватываются потоком холодного воздуха, создаваемого вентиляторами, в результате чего происходит интенсивное перемешивание воды с холодным воздухом.

Более широкое применение получили установки, созданные по схеме вентиляционного пневмогидропульта. В таких установках в воздушный поток низкого давления наряду с диспергированием воды дополнительно вводятся ядра кристаллизации, вызывающие замерзание водного аэрозоля. Эти ядра формируются с помощью пневмогидравлических форсунок или специальных устройств.

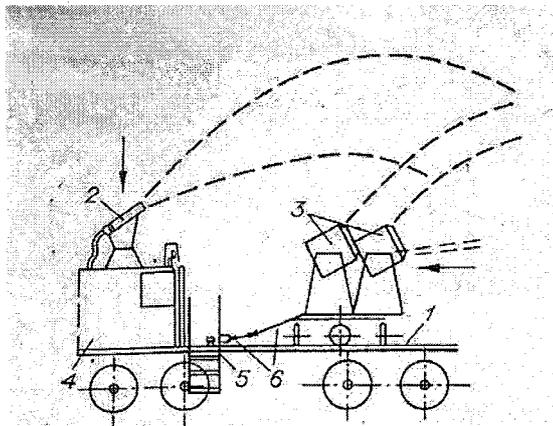


Рис. 7.3. Устройство для производства гранулированного льда с помощью вентиляционного гидропульта: 1 – самоходная платформа; 2 – воздушно-пенные стволы для диспергирования воды; 3 – осевые вентиляторы для подачи воздуха; 4 – теплоизолированная кабина; 5 – электродвигатель; 6 – тросо-блочная система для вращения вентиляторов в горизонтальной плоскости.

Аэродинамические трубы. Принцип работы этих устройств основан на разбавлении полученного аэрозоля в поверхностно-ограниченном потоке и дифференциальном переохлаждении распыленной воды. В таких установках можно получить снег, наиболее близкий к естественному, однако производительность установок мала. На рис. 7.4 представлен один из возможных вариантов установки. Она содержит аэродинамическую трубу для создания потока воздуха, внутри которой имеется зона формирования ядер кристаллизации. В этой зоне в воздушный поток вводится пропан или другой хладагент. Вода распыляется в поток специальной форсункой. Переохлажденная смесь при выходе из трубы перемешивается с атмосферным воздухом, при этом удаляются остатки тепла и капли замерзают, образуя частицы, внешне напоминающие естественный снег.

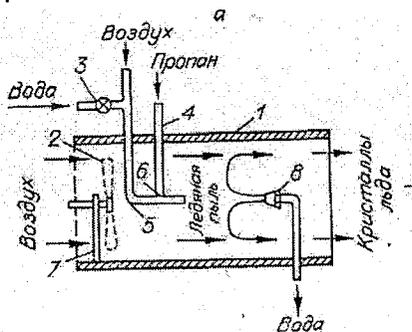


Рис. 7.4. Устройство для получения искусственного льда с использованием аэродинамической трубы: 1 – трубчатый кожух; 2 – вентилятор; 3 – водная магистраль; 4 – труба для подачи метана; 5 – труба с водно-воздушной смесью; 6 – смеситель; 7 – стойка крепления вентилятора; 8 – форсунки для распыления воды.

7.2. Композитные материалы с ледяной матрицей

Как указывалось выше, одним из перспективных направлений в материаловедении является создание композитных материалов. Для таких материалов удастся существенно повысить некоторые прочностные характеристики, причем это увеличение прочности может оказаться больше, чем прочность элементов составляющих композицию.

При создании сооружений из льда важным является повышение прочности льда, снижение его зависимости от температуры и обеспечение сохранности ледяной конструкции. Эти проблемы могут решаться благодаря применению композитных материалов с ледяной матрицей. В композитных материалах удается добиться относительно высокой прочности при сохранении достаточной вязкости разрушения. Это происходит за счет того, что трещины, возникающие в матрице, встречают препятствия для своего развития на границах раздела матрица – волокно. Другими словами, в композитных материалах развитие трещин тормозится.

Из теории композитных материалов известно, что их прочность во многом определяется величиной площади поверхности раздела между наполнителем и матрицей, а также силами сцепления в плоскости контакта. Величину этих сил определяют, задавая деформацию сдвига между поверхностью и льдом. Данные Мишеля о смерзании льда с различными материалами приведены в табл. 7.2. Отечественные исследователи отмечают, что на величину сил сцепления существенное влияние оказывают температура, шероховатость наполнителя и соленость льда [49]. Увеличение шероховатости и уменьшение температуры и солености приводят к возрастанию сил сцепления (смерзания).

Механические свойства композита могут быть описаны с помощью свойств наполнителя и матрицы. Например, предел пластичности на сдвиг всего композита может быть рассчитан по формуле

$$\tau_k = \frac{\tau_m}{\left(1 + \frac{2}{3}C\right)} \left[\frac{5\tau_s}{3\tau_m} C + (1-C) \sqrt{1 + \frac{2}{3}C \left(1 - \frac{\tau_s^2}{\tau_m^2}\right)} \right],$$

где τ_k – предел пластичности на сдвиг всего композита; τ_m – предел пластичности на сдвиг матрицы (льда); τ_s – предел пластичности на сдвиг армирующей добавки; $C = V_1/V$, V_1 – объем включений; V – объем всей системы.

Таблица 7.2

Сила смерзания льда с различными материалами и покрытиями
Скорость приложения нагрузки 0,036 МПа/с

Материалы и покрытия	Срез, МПа
Металлы	
Мягкая сталь	0,85
Отпущенная сталь	0,82
Медь	0,89
Алюминий	0,64
Никель	0,61
Цинк	0,64
Гальванизированная сталь	0,78
Дерево	
Ель	0,32
Другие породы	0,46
Пластические массы и другие материалы	
Лигнофаль	0,57
Полиметил	0,28
Ацетат целлюлозы	0,18
Стекло	0,46
Резина	0,14 – 1,07
Краски	
Палубная краска	0,57
Шаровая краска	0,71
Пленки и покрытия	
Кислотные	0,57 – 0,93
Щелочные	0,53 – 0,68
Эпоксидные	0,57 – 0,93
Полиэтилены	0,43 – 0,64
Феноловые	0,21 – 0,78
Кремнивые	0,28 0,68
Уретановые	0,68 – 0,93
Ваниловые	0,36 – 0,57
Виниловые	0,64 – 0,82

Если можно считать, что армирующая добавка не деформируется, то расчетная формула существенно упрощается:

$$\tau_k = \frac{\tau_m}{\sqrt{1 + \frac{3}{2}C}}$$

Наиболее часто используют волокнистые композиции, которые представляют собой системы, состоящие из набора чередующихся двухмерных армирующих элементов в виде пластичных материалов. В таких композициях упрочняющими материалами служат волокна, а матрица является средой, передающей нагрузку на волокна. Границы раздела между зернами матрицы и волокнами определяют прочность всей композитной системы. Для описания их влияния вводится коэффициент ξ , отражающий отношение поверхности волокон в единице объема композита к поверхности зерен в матрице в том же объеме:

$$\xi = \frac{S_k}{S_l},$$

где S_k – площадь поверхности волокон в единице объема; S_l – площадь поверхности ледяных зерен матрицы.

Влияние этого коэффициента на прочность системы описывается выражением

$$\sigma = \tilde{\sigma}|_{S_k=S_l} + K(\xi - 1),$$

где K – коэффициент размерности Па, учитывающий силы смерзания волокна со льдом.

Армирование льда осуществляется короткими или непрерывными волокнами. При использовании коротких волокон их длину необходимо выбирать из следующего соотношения:

$$l_c \geq \frac{\sigma_s D}{2\tau_m},$$

где D – диаметр волокна, σ_s – его прочность на разрыв.

В этом случае напряжения, возникающие в волокне, сравнимы с напряжениями в волокне бесконечной длины.

При армировании льда непрерывными волокнами прочность композита может быть определена из уравнения

$$\sigma_k = V_s \overline{\sigma_s} + V_m \overline{\sigma_m},$$

где $\overline{\sigma_s}, \overline{\sigma_m}$ – средние значения прочности волокон и матрицы; V_s, V_m – объемные доли волокон и матрицы соответственно.

При армировании волокнами обычно стремятся к тому, чтобы прочность композита превышала прочность льда σ_l (без армирующих элементов).

$$\sigma_k = V_s \overline{\sigma_s} + (1 - V_s) \overline{\sigma_m} \geq \sigma_l.$$

Из этого уравнения можно найти объемную критическую долю наполнителя, при которой происходит увеличение прочности композита по сравнению с матрицей.

$$V_s = \frac{\sigma_l - \overline{\sigma_m}}{\overline{\sigma_s} - \overline{\sigma_m}}.$$

Из этой формулы следует, что объемная доля армирующих добавок уменьшается при возрастании средней прочности волокон по сравнению со средней прочностью матрицы.

Канадские исследователи нашли соотношение для прочности ледяной композиции:

$$\frac{\sigma_k}{\sigma_m} = V_s \frac{E_s}{E_m},$$

где E_s, E_m – модули нормальной упругости волокна и матрицы.

Из этого уравнения следует, что модуль упругости армирующего волокна должен быть больше, чем у ледяной матрицы. Например, модуль нормальной упругости стекловолокна превышает модуль ледяной матрицы в 30 раз, а модуль волокна только в 5 – 8 раз. Величину σ_k/σ_m иногда называют коэффициентом упрочнения. На рис. 7.5 представлены теоретические зависимости коэффициента упрочнения от соотношения модулей нормальной упругости волокна и матрицы.

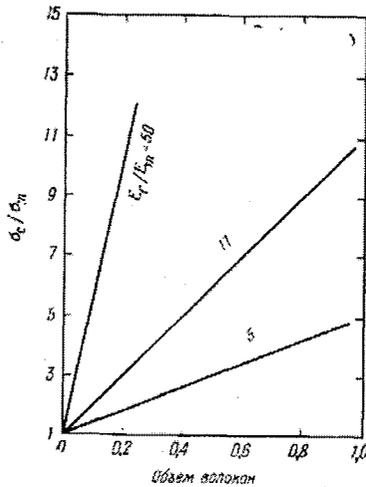


Рис. 7.5. Влияние отношения модулей упругости и объема наполнителя на прочность композита.

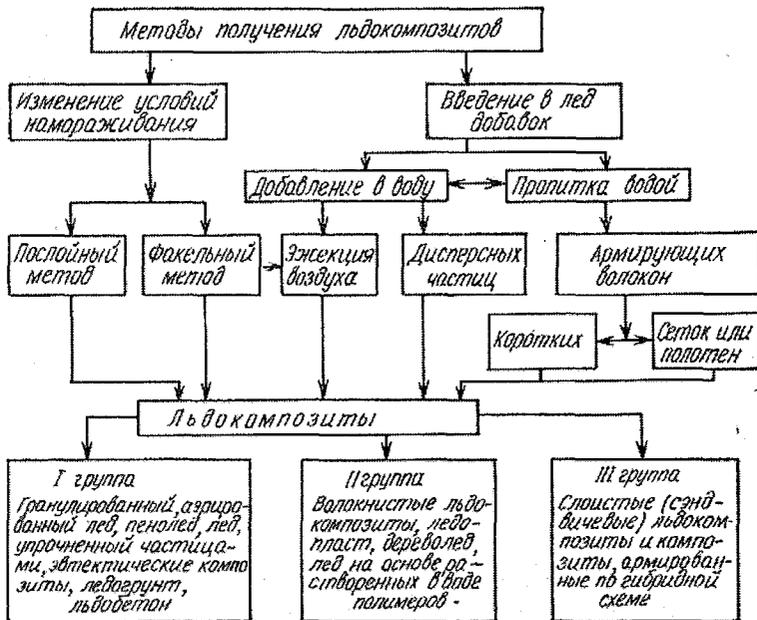


Рис. 7.6. Методы получения композитных материалов из льда.

В настоящее время разработаны различные способы получения композитных материалов из льда. Основные способы представлены на рис. 7.6. На этом рисунке гранулированный, аэрированный и пенолед были подробно рассмотрены ранее. Ниже приводятся некоторые результаты исследований механических свойств ледяных композитов.

Были проведены многочисленные экспериментальные исследования по армированию льда различными материалами. Например, изучалось армирование льда древесным волокном. Размеры таких волокон достигают 5 мм. Древесное волокно легко разводится водой, образуя суспензию, из которой намораживают лед. Авторы назвали этот лед ледопластом. Результаты исследований показали, что прочность на изгиб такого материала зависит от содержания в нем древесного волокна ($n\%$):

$$n = A \exp(B\sigma_f),$$

где A , B – эмпирические коэффициенты. Наилучшие результаты получаются при разведении в замораживаемой воде 5 – 7 % массы древесного волокна. При этом значение прочности ледопласта на изгиб превышает в 2,5 – 3 раза прочность пресного льда при той же температуре, прочность на сжатие в 3 – 4 раза больше, чем у пресного льда.

Установлено, что пластические деформации развиваются в пресном льду в несколько раз быстрее, чем в ледопласте. Ползучесть ледопласта под влиянием длительно действующих напряжений в несколько раз меньше, чем у чистого поликристаллического льда, и уменьшается с понижением температуры.

Влияние наибольшего количества веществ на характеристики армированного льда изучено канадскими учеными. Они исследовали в качестве наполнителя такие материалы, как тянутое стекло, асбест, пульпа из газетной бумаги, длинные и короткие древесные волокна и опилки, битое стекло. Результаты их экспериментов просуммированы на рис. 7.7.

Российскими учеными выполнено исследование прочности ледяных композитов на изгиб, армированных волокнами. Результаты экспериментов представлены в виде эмпирических зависимостей:

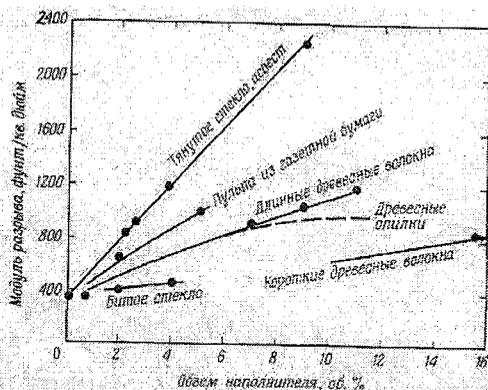


Рис. 7.7. Зависимость прочности армированного льда от типа и объема наполнителя.

– при армировании стекловолокном

$$\sigma_f^k = 1,4(1 + 0,07|T|) + 029|T|^{0,63} \Phi \frac{l}{d}, \quad l \leq 25 \text{ мм};$$

– при армировании древесными опилками

$$\sigma_f^k = 1,4(1 + 0,07|T|) + 0,36|T|^{0,63} \Phi \frac{l}{d}, \quad l \leq 10 \text{ мм},$$

здесь $\Phi = \frac{\rho_s}{f(\rho_s - \rho_m)}$, f, l, d – длина и диаметр волокна; где ρ_s, ρ_m – плотности армирующих волокон и ледяной матрицы; f – весовая доля армирующей фазы.

Другое направление в изучении армирования льда отталкивается от хорошо разработанного научного направления – механики мерзлых грунтов. Последователи этого направления предлагают армировать лед сыпучими естественными материалами, например, песком. Впервые подобный композит – "ледяной бетон" был предложен в 1934 г. профессором Скрамтаевым. "Ледяной бетон" представлял собой однородную замороженную смесь песка, гравия и воды.

Описаны интересные результаты опытов с ледяным композитом, полученным добавлением песка. Для получения ледяного материала с равномерным распределением примеси была разработа-

на специальная технология, заключающаяся в промораживании дозированной, тщательно перемешанной и пропитанной водой смеси снега и песка. В экспериментах на одноосное сжатие исследовалось влияние крупности песка и скорости нагружения образца. Результаты опытов показали, что прочность композита довольно заметно уменьшается при увеличении крупности песка. Поэтому, по мнению исследователей, при возведении сооружений из такого композитного материала необходимо стремиться к использованию мелкозернистых добавок и наиболее плотной их упаковке.

Полученные выводы подтверждаются данными другого исследования, результаты которого приведены на рис. 7.8.

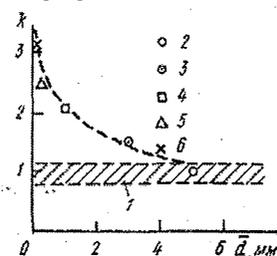


Рис. 7.8. Зависимость коэффициента упрочнения при изгибе льдокомпозитов в зависимости от среднего размера дисперсных частиц и их весового содержания:

- 1 – лед без частиц; 2 – 6 композиции с частицами; 2 – керамзита (30%);
3 – мелкого гравия (74%); 4 – крупного песка (78%); 5 – мелкого песка (80%);
6 – мелких частиц глины (72%).

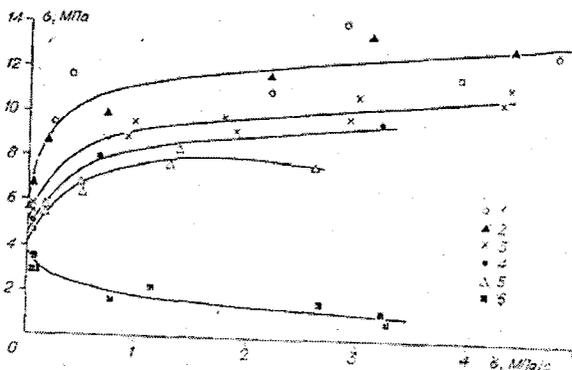


Рис. 7.9. Зависимость прочности льда с примесью песка от скорости нагружения:

- 1 – 6 – при объемной льдистости 32, 35, 50, 70, 85 и 100% соответственно.

В этой же работе изучалось влияние скорости погружения на прочность композитного льда. Результаты представлены на рис. 7.9.

Приведенные данные показывают, что пока льдистость образца не превышает 70 %, при увеличении скорости нагружения прочность возрастает. При 85 % льдистости заметно незначительное снижение прочности. Прочность чистого льда при увеличении скорости нагружения падает. На основании этих опытов сделан вывод о возможности исключения эффекта снижения прочности льда добавлением небольшого количества минеральных добавок.

7.3. Моделированный лед

При проектировании различных инженерных сооружений уровень ледовых нагрузок на них часто является определяющим при выборе того или иного технического решения. Расчетное определение ледовой нагрузки для сложных технических объектов представляет собой довольно сложную задачу из-за больших трудностей при описании поведения льда под нагрузкой. Поэтому одним из основных методов получения информации о ледовой нагрузке на инженерные сооружения является метод физического моделирования. Он широко применяется при исследованиях взаимодействия различных технических устройств и сооружений со сплошной средой. Основан на замене изучения некоторого физического явления в натуральных условиях на изучение аналогичного явления на модели, размеры которой изменены в ту или другую сторону по отношению к исходному объекту. Основной целью такого моделирования является получение информации об интересующем явлении на основании поведения модели (обычно такой эксперимент провести легче, чем с натурным объектом). При этом возникает дополнительная задача адекватного пересчета модельных данных на натурные условия.

Моделирование осуществляется в соответствии с критериями подобия, под которыми понимают безразмерные комплексы, составленные из основных характеризующих явление физических величин. Эти комплексы могут быть получены двумя путями: во-первых, при записи определяющих явления уравнений, граничных

и начальных условий в безразмерном виде; во-вторых, при применении к рассматриваемому явлению теории размерности, в частности знаменитой П-теоремы.

Теория моделирования ледовой нагрузки была разработана российскими учеными академиком Ю.А. Шиманским и профессором Л.М. Ногидом. В соответствии с этой теорией при моделировании ледовой нагрузки должны выполняться следующие критерии моделирования:

– число Фруда $Fn = \frac{v}{\sqrt{gL}}$;

– число Коши $Ch = \rho \frac{v^2}{E}$;

– коэффициент трения $f_I^M = f_I^H$,

где v – характерная скорость процесса; L – характерная длина; ρ – плотность среды; E – модуль упругости среды; f_I^M, f_I^H – коэффициенты трения льда по поверхности; верхние индексы "М" и "Н" означают модель и натуру.

Эти критерии являются совместимыми, что позволяет с их помощью выполнять моделирование.

Применительно к ледяному покрову следуют требования:

– прочность ледяного покрова $\frac{\sigma_H}{\sigma_M} = \lambda$;

– модуль Юнга $\frac{E_H}{E_M} = \lambda$;

– толщина $\frac{h_H}{h_M} = \lambda$,

где λ – масштаб.

Таким образом, все основные характеристики ледяного покрова должны быть уменьшены в масштаб раз. Лед, удовлетворяющий этим требованиям, называется моделированным.

В настоящее время разработано несколько технологий получения моделированного льда. Первая в мире такая технология была разработана специалистами ААНИИ при создании ледового

бассейна. В основу этой технологии был положен известный факт уменьшения прочности льда с ростом его солёности. При рассмотрении свойств льда было отмечено, что солёность льда зависит от солёности воды, из которой он намораживается. Поэтому представляется возможным построить зависимость прочности льда от солёности воды. Пример такой зависимости показан на рис. 7.10.

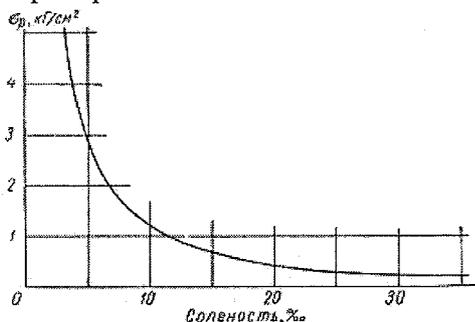


Рис. 7.10. Зависимость прочности льда на изгиб от солёности воды.

Эта зависимость была положена в основу технологического процесса получения моделированного льда. Первоначально для получения льда с заданным снижением прочности подбирали необходимую солёность воды, используемой для намораживания. Такой способ выполним в небольших ледовых бассейнах, где легко сменить воду при переходе от одной серии опытов к другой. В больших ледовых бассейнах такая операция занимает много времени, кроме этого она требует весьма значительных финансовых затрат. Поэтому в больших ледовых бассейнах солёность воды поддерживают примерно на одном уровне 10 – 15 ‰, который обеспечивает достаточное снижение прочности льда. Более точно прочность моделированного льда подбирают, варьируя температуру моделированного ледяного покрова, используя соответствующие зависимости прочности льда от температуры.

Сама технология получения моделированного льда заключается в следующем. Перед началом посева температуру воздуха в ледовом бассейне понижают до -10°C . С поверхности воды убирают остатки битого льда и ледяное сало. Температуру воды в бассейне поддерживают на уровне температуры кристаллизации, которая зависит от солёности воды. Над очищенной поверхностью

воды распыляют небольшое количество воды (ее количество от размеров бассейна), которая во время падения в воздухе замерзает. Упавшие на воду замерзшие капли становятся ядрами кристаллизации, инициирующими рост ледяного покрова. По этой технологии ледяной покров растет как и в естественных условиях сверху вниз.

За полвека существования ледовых бассейнов неоднократно предпринимались попытки улучшить описанную выше методику. В основном эти попытки сводились к поискам новых компонент, которые бы лучше, чем NaCl, обеспечили соблюдение критериев подобия. Большая работа в этом направлении была проделана канадским исследователем Тимко. Вначале им было предложено использовать вместо раствора хлористого натрия раствор карбамида (мочевины) $\text{NH}_2 - \text{CO} - \text{NC}_2$. Результаты проведенных исследований показали, что моделированный лед, полученный из 1,3% карбамида, удовлетворяет всем требованиям и наилучшим образом соответствует характеристикам натурального льда. Одним из существенных недостатков этого льда является медленное протекание в нем физических процессов, что существенно снижает возможность получения заданных прочностных свойств, путем регулирования температуры.

Продолжая свои исследования в области создания моделированного льда, Тимко разработал трехкомпонентный лед, для чего использовались три вида химических компонентов.

1. Примесь с низким молекулярным весом, которая снижает прочность льда за счет внутреннего таяния и образования рассола. Для этой цели был предложен этиленгликоль $\text{HOCH}_2 - \text{OH}$.

2. Поверхностно-активное вещество, снижающее поверхностное натяжение в растворе и способствующее образованию столбчатой структуры моделированного льда. Проведенные опыты показали, что наилучшие результаты дает использование поющих веществ, разработанных для посудомоечных машин, так как они не обладают высокой пенностью.

3. Органическое вещество с высоким молекулярным весом, которое сдерживает рост кристаллов льда в горизонтальном направлении и таким образом способствует образованию мелкозернистой структуры льда. В качестве этой компоненты был выбран сахар.

В настоящее время такой лед используется в одном из ледовых бассейнов Канады.

Технология намораживания карбамитного и трехкомпонентного льда в основных своих чертах совпадает с описанной выше. Общим недостатком этой технологии являются довольно существенные временные затраты на приготовление льда. В среднем скорость роста ледяного покрова составляет 1 – 2 мм/ч.

При создании моделированного льда финские специалисты из Арктического исследовательского центра пошли несколько другим путем. Они попытались создать моделированный лед, приготовление которого требует минимальных временных затрат. Они предложили распылять соленую воду в атмосфере бассейна, предварительно охлажденной до температуры $-25 \dots -30$ °С. Для этого использовалась специальная технологическая тележка, перемещающаяся по рельсам бассейна. При применении такой технологии рост моделированного льда происходит как рост снежного покрова – снизу вверх. Фактически финская методика является использованием для получения моделированного льда способа гидравлического дальноструйного факела, применяющегося для производства гранулированного льда.

Требуемая толщина ледяного покрова достигается заданием нужного количества циклов намораживания (количества пробегов технологической тележки). Сразу после окончания "засева" образуется слой, состоящий из отдельных гранул льда. Для придания этому слою заданных свойств используется специальный температурный режим, включающий фазы сохранения, упрочнения и термообработки. Применение этой технологии позволяет в 2 – 3 раза повысить производительность ледовых бассейнов.

Российскими специалистами под руководством профессора В.А. Зуева разработана оригинальная технология приготовления композитного моделированного льда (рис. 7.11). Этот лед готовится из смеси полиэтиленовых шариков и пресной воды. По поверхности бассейна равномерно распределяется слой полиэтиленовых частиц, который промораживается не на всю толщину. Толщина слоя льда находится из выражения

$$h = \frac{m_s}{\rho_s S} + \frac{m_l}{\rho_l S},$$

где m_s, m_l – масса наполнителя (полиэтилена) и масса матрицы (пресноводного льда); ρ_s, ρ_l – плотность полиэтилена и льда; S – площадь поверхности.

Варьирование упругих и прочностных свойств льда осуществляется за счет изменения промороженного слоя δ :

$$\delta = \frac{m_s + m_l}{\rho_s S}.$$

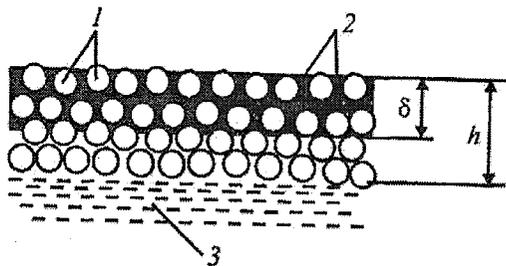


Рис. 7.11. Композитный моделированный лед:
1 – частицы полиэтилена; 2 – пресноводный лед; 3 – вода.

8. Технологии использования льда и снега в хозяйственной деятельности и методы борьбы с ледовыми проблемами

8.1. Сферы использования льда в хозяйственной деятельности

Лед и снег широко используется в хозяйственной деятельности человека. Представление о некоторых основных сферах их применения дает рис. 8.1.

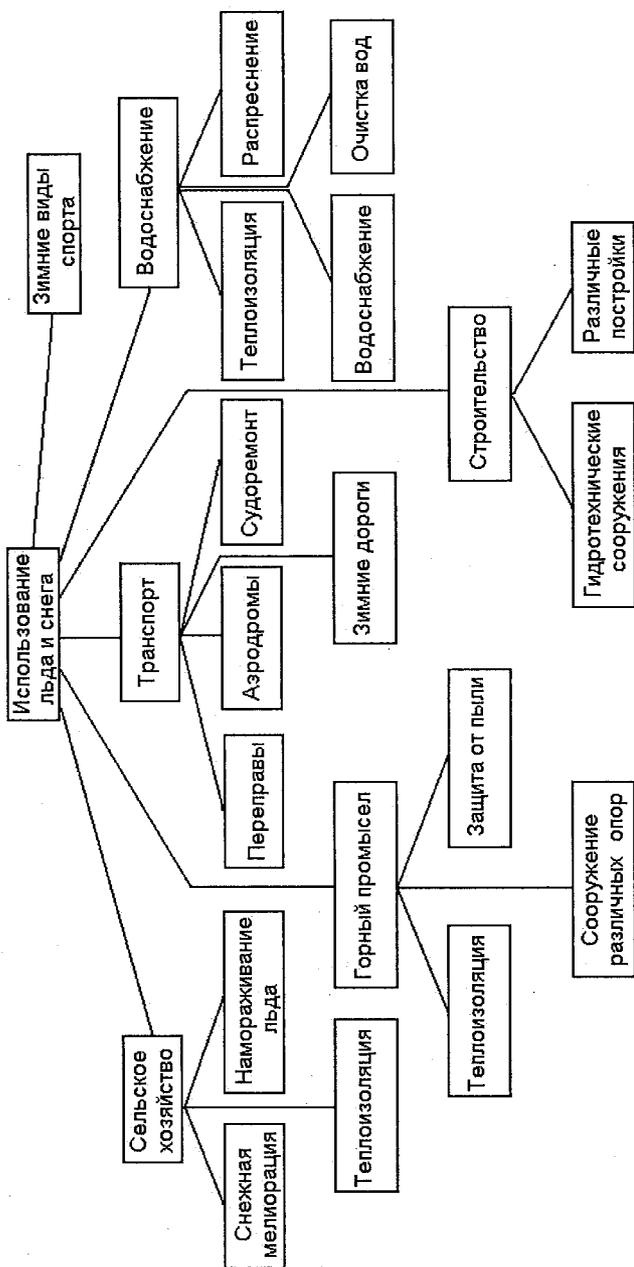


Рис. 8.1. Использование льда и снега в хозяйственной деятельности человека.

Как следует из рисунка, в сельском хозяйстве лед и снег используется для создания на полях запаса влаги. Здесь основным способом служит снежная мелиорация. Она осуществляется следующими техническими и агротехническими приемами: снегопахатой специальными снегопахами на тракторной тяге; оставлением высокого жнивья после уборки зерновых культур и безотвальной обработкой почвы специальными противэрозионными орудиями; посевом высокостебельных растений (подсолнечник, кукуруза, горчица и т.п.); созданием полезащитных лесных и кустарниковых полос; расстановкой щитов. Все эти способы способствуют накоплению в зимний период на полях снега. В ряде регионов страны, в которых выпадает недостаточное количество осадков, влагонакопление на полях в зимний период осуществляют с помощью искусственного намораживания льда. Опыт, полученный земледельцами на юге Забайкалья и в Хакасии, показывает, что послонное намораживание льда на полях резко повышает урожайность сельскохозяйственных культур. В Хакасии такой способ мелиорации стали применять во время Великой Отечественной войны. Такие искусственные наледи, а также пенолед, используются еще и для защиты от промерзания больших площадей.

При производстве горных работ часто возникают ситуации, когда необходимо защитить добываемую породу от промерзания. Для этого используют естественный или искусственный снег или лед. Интересная технология предохранения пород от промерзания при разработке мерзлых россыпей драгами применяется в условиях Сибири, Севера и Дальнего Востока страны.

Для создания защитных ледяных массивов на предохраняемых от промерзания площадях сооружают специальные водоемы. Из слабофильтрующихся пород возводят плотины высотой 3 – 10 м, расположенные на расстоянии 150 – 1000 м друг от друга. Осенью, когда прекращается естественное оттаивание пород, в эти водоемы наливают воду. Уровень воды выбирается таким образом, чтобы с учетом неизбежных потерь на фильтрацию он обеспечивал наморозку ледяного покрова толщиной 1,8 – 2 м. Такой ледяной покров надежно предохраняет породы от промерзания и позволяет существенно раньше начинать их разработку при наступлении теплого времени года.

Другим важным направлением использования снега в горном деле является пылеподавление при производстве открытых работ в карьерах. Подавление пыли снегом происходит благодаря адгезии аэрозольных частиц к ледяной поверхности. При этом очень важно, что снежная масса имеет развитую поверхность, величина которой может достигать 50 м^2 на килограмм снега. Снежинки во время падения являются фильтрующим и экранирующим элементом зоны пылевыделения. С их помощью можно полностью изолировать очаг пылевыделения. Массу пыли m , осевшей на падающую снежинку, можно оценить следующим образом:

$$m = EUStc,$$

где c – концентрация пыли, мг/м^3 ; τ – время полета снежинки, с; U – скорость падения снежинки, которую можно рассчитать по эмпирической формуле

$$v_{\infty 0} = 0,67(\rho_s - \rho_a)^{0,25}$$

(ρ_s, ρ_a – плотность снега и воздуха соответственно);

E – коэффициент захвата или осаждения, представляющий собой отношение осевшей массы пыли к общей массе, прошедшей через миделевое сечение S . Этот коэффициент рассчитывается по формуле

$$E = \frac{k^2}{(k + 0,5)^2}$$

(k – число Стокса: $k = \frac{2}{9} \rho \frac{d^2 U_{\infty}}{\mu_a d_s}$, здесь ρ – плотность частиц пыли, кг/м^3 ; d – размер частицы пыли, м; U_{∞} – скорость невозмущенного потока, м/с; μ_a – динамическая вязкость воздуха, $\text{кг/(с}^2 \cdot \text{м}^2)$; d_s – средний поверхностный размер снежинки, м).

Расчеты по этим формулам показывают, что при падении снежинки с характерным размером $d_s = 216$ мкм в поле силы тяжести и при средних размерах частиц пыли $d = 10$ мкм коэффициент захвата составит $E = 0,986$. Таким образом, снежинки могут поглотить практически всю пыль.

Обычно для пылеподавления используется искусственный снег, создаваемый по одной из описанных выше методик.

При добыче полезных ископаемых с помощью шахт, проложенных в мерзлых грунтах, лёд используется для создания искусственных опор, обеспечивающих поддержание выработанного пространства. Лёд в шахтах может создаваться путем послойного намораживания, либо закладкой в пустоты дробленого льда, добытого на поверхности и доставленного в шахту. Для придания монолитности опоре она смачивается водой.

Применение льда и снега на транспорте при сооружениях зимних дорог, ледяных переправ, аэродромов и т.п. более подробно будет рассмотрено ниже. Кратко представим техническую операцию, называемую выморозка. Технология выморозочных работ может использоваться при выполнении судоремонтных работ, поднятии со дна водоемов судов и других материальных ценностей, при строительстве защитных дамб, ремонте гидротехнических сооружений и т.п. Эта технология заключается в постепенной выборке льда с площади выморозки, что обеспечивает интенсивное нарастание льда на нижней поверхности ледяного покрова. В результате выполнения этих работ получается ледяной колодец, с помощью которого осушается часть подводной поверхности судна или гидротехнического сооружения. На эффективность проведения выморозочных работ большое влияние оказывают наличие снега, перепады температуры, скорость подледного течения, наличие пузырьков воздуха во льду и т.д.

Строительство изо льда известно с давних времен, особенно в полярных странах. Из-за недостатка естественных строительных материалов, таких как камень или дерево, люди были вынуждены устраивать для жилья ледяные пещеры или хижины. Многими исследователями севера описаны хижины эскимосов – «иглу», которые они с большим искусством возводят из снега. Эти хижины можно отапливать тюленьим жиром, что обеспечивает в них вполне допустимые условия существования.

Широко известен факт строительства в Петербурге в 1740 г. по приказу императрицы Анны Иоановны Ледяного дома длиной 17 м, шириной 5,3 м и высотой до конька кровли 6,4 м. И в последствии лёд часто использовался как строительный материал. Наи-

более часто его использовали в военном деле для создания оборонительных сооружений.

Более широкое применение льда для строительства началось со второй трети XX в. Были разработаны и внедрены различные сооружения из льда: дамбы, причалы, мосты, склады для хранения сельхозпродукции и т.д.

В настоящее время в северных районах вновь возник интерес к инженерным сооружениям из льда и снега. В этих регионах только лед и снег часто являются единственными строительными материалами, которые легко могут быть добыты на месте. Поэтому экономически оказывается выгодным создавать из них временные инженерные сооружения. Несомненным достоинством сооружений из льда и снега является их самоликвидируемость. В соответствии с современными требованиями любое инженерное сооружение, возводимое на Севере, должно быть демонтировано после истечения срока его использования. Часто демонтаж сооружения является не менее сложной задачей, чем его строительство.

При возведении сооружений из льда и снега необходимо обеспечить их деформативную и термическую устойчивость на время эксплуатации сооружения. При длительном воздействии постоянных по величине нагрузок, что обычно наблюдается в ледяных сооружениях, которые находятся под воздействием нагрузки от собственного веса, пластические деформации приобретают характер вязкого течения. Эти течения характеризуются коэффициентом вязкости η . Величина этого коэффициента зависит от уровня действующих напряжений и времени их действия, а также от структуры льда, ориентировки кристаллов и температуры. Таким образом, расчет сооружений из льда и снега сводится к определению осадки сооружения за время его эксплуатации, вызванной наличием вязкого течения.

Термоустойчивость ледяного инженерного сооружения может быть обеспечена за счет термоизоляции ледяного массива. Обычно теплоизоляция осуществляется путем засыпания толстого слоя опилок на лед. Толщина такого слоя теплоизоляции в метрах для небольших ледяных инженерных конструкций рассчитывается по эмпирическим формулам.

Важная сфера использования льда – это обеспечение водоснабжения. В северных регионах страны существует проблема транспортировки воды с низкой температурой в больших количествах и на дальние расстояния. При этом не всегда возможно осуществить подогрев воды, чтобы избежать ее замерзания. Решением проблемы является теплоизоляция потока, не допускающая его полного промерзания. В северных регионах накоплен обширный положительный опыт использования льда и снега в качестве теплоизолирующего материала, обеспечивающего возможность водоснабжения.

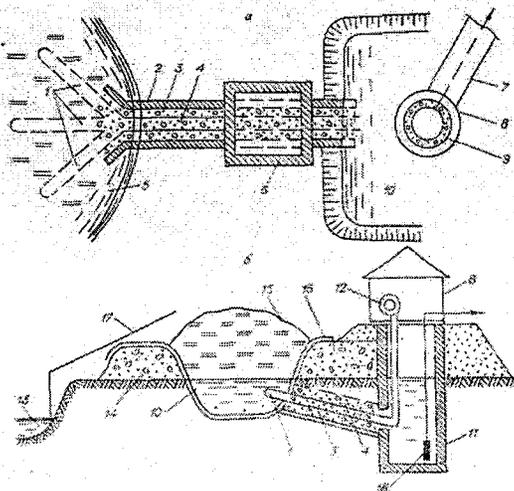


Рис. 8.2. Водоснабжение из ледников (а) и искусственных ледяных массивов (б):
 1 – теплопроводы; 2 – водосборный желоб; 3, 4 – фильтры; 5 – ледяной массив, или ледник; 6 – тепловой пункт; 7 – эстакада; 8 – насосно-хлораторная;
 9 – фильтрующий водозабор; 10 – водосем-копаны; 11 – водоприемная шахта;
 12 – теплогенератор; 13 – перемерзающий источник; 14 – обвалование;
 15 – искусственный ледяной массив; 16 – пленочный экран;
 17 – подача воды на замораживание; 18 – насос.

В настоящее время имеются технические решения, позволяющие получать воду из льда и снега. Все эти предложения базируются на расплавлении льда (снега) паром, горячей водой или электрообогревом по мере необходимости. Для получения пресной воды могут быть использованы естественные запасы снега, под-

земных льдов, речных наледей, ледников и т.д. В качестве примера на рис. 8.2 приведены схемы водоснабжения из ледников и искусственных ледяных массивов.

Ледовые технологии применяются в водоподготовке для опреснения соленых вод, а также для очистки их от биологических и промышленных примесей. Необходимость в распреснении вод возникает при попытке использовать солоноватые и соленые подземные воды, запасы которых имеются в засушливых регионах России. Технология распреснения достаточно простая. Сначала лед намораживается из солоноватой или соленой воды. Затем его температуру повышают. Экспериментально было установлено, что интенсивное стекание рассола наблюдается при температуре примерно -3°C . Происходит стекание рассола, содержащего минеральные соли. Соленость воды, полученной лавлением оставшегося льда существенно ниже начальной. Такую воду можно использовать в некоторых видах хозяйственной деятельности.

Применение льда и снега в индустрии отдыха и развлечений общеизвестна.

8.2. Зимники и ледяные переправы

Термин зимники или зимние дороги называют любой из четырех ниже перечисленных типов дорог из снега и льда, эксплуатируемых в зимой.

Зимний путь – дорога, возникающая при единичном проходе колесной или гусеничной техники.

Снежная дорога, она строится из уплотненного и переработанного снега.

Снежная дорога с ледяным покрытием – при строительстве такой дороги используется вода для упрочнения поверхностного слоя снега и увеличения его несущей способности.

Ледяная дорога, такая дорога строится путем разбрызгивания воды для образования слоя льда. Дороги этого типа создают в регионах, в которых малы запасы снега. Ледяными дорогами также называют дороги, проложенные поперек замерзших рек или озер.

Строительство наземных зимников начинают только при промерзании грунта до такой степени, что выдерживает нагрузку от

легкого транспортного средства. Окончание их эксплуатации совпадает с периодом естественного разрушения снега или льда.

Способность зимней дороги обеспечивать движение транспорта определяется плотностью и твердостью снежного покрова, поэтому при ее создании смерзание снега является важным процессом. Плотность снега на дороге должна быть не менее 500 кг/м^3 . Этапу смерзания снега предшествуют работы по его уплотнению, которые выполняются с помощью специальной техники.

Твердость снежного покрытия определяется по результатам испытаний специальным измерительным инструментом – ударным пенетрометром или штампом, имеющим сферическую или коническую форму. При вдавливании в снежный покров штампа фиксируется приложенная к нему нагрузка и глубина внедрения. Для конусного штампа твердость снега определяется по формуле

$$\sigma = \frac{P}{\pi h^2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}},$$

где P – нагрузка на штамп; h – глубина погружения штампа в снег; α – угол у вершины конуса штампа.

Пенетрометр представляет собой зонд, который погружается в снег под действием падающего груза. Впервые пенетрометр был предложен в Швейцарии Р. Хэфели в 1939 г. На рис. 8.3 показан внешний вид швейцарского пенетрометра. Твердость снега определяется по формуле

$$\sigma = \left(\frac{mH}{\Delta h} + m + m' \right) \frac{g}{F},$$

где m – масса падающего груза; m' – масса всех деталей зонда, перемещающихся под действием силы удара (вес наконечника, основной штанги и направляющей вместе с соединениями); F – площадь поперечного сечения наконечника; H – высота падения груза; Δh – погружение зонда при одном ударе.

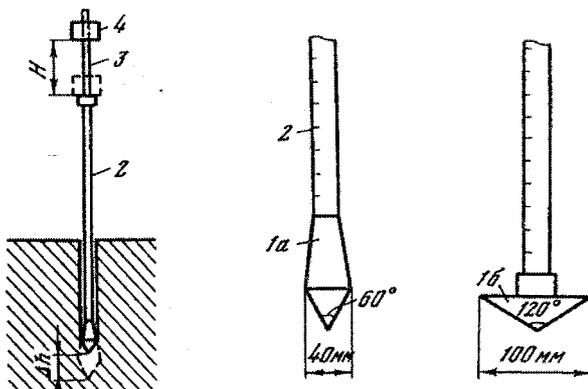


Рис. 8.3. Швейцарский ударный пенетромтр: 1а – стандартный наконечник; 1б – наконечник для мягкого снега; 2 – ударная штанга; 3 – направляющий шток; 4 – падающий груз.

Величина твердости снежного покрова не является строгим физическим параметром снега. Однако ее удобно использовать для анализа состояния зимних дорог, так как существует корреляционная связь между твердостью и плотностью:

$$R = 3,826\rho - 1618,$$

где ρ – плотность снега. Твердость снега для нормальной эксплуатации дороги должна быть не менее 350.

Технология, применяемая при строительстве зимней дороги, зависит от ее типа.

Дорога из уплотненного снега сооружается в результате многократного прохода гусеничного трактора в сцепке с волокушей или катком. Строительство дороги начинается сразу после первых снегопадов. Затем проводят первоначальное уплотнение, что способствует увеличению теплопроводности снежного покрова и дальнейшему промерзанию болот и торфяников на достаточную глубину, чтобы выдержать вес более тяжелых машин. После этого приступают к завершающему этапу создания дороги. Поверхностный слой дороги уплотняется с помощью волокуш и катков. На рис. 8.4 показано, как изменяется твердость уплотненного снега по вертикали.

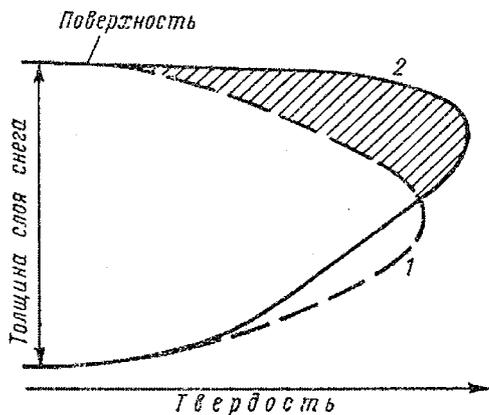


Рис. 8.4. Распределение твердости естественно залегающего снежного покрова (1) и снега, уплотненного специальной укаткой (2).

Дороги из переработанного снега создаются только тогда, когда несущая способность ее не может быть обеспечена в результате одного лишь уплотнения снега. Переработка снега перед уплотнением его на полотно дороги позволяет достигать большей плотности снежного покрова. Во время переработки происходит разрушение снежных частиц, при этом увеличивается число контактирующих точек. Кроме этого, происходит перемешивание различных слоев снега, имеющих разную температуру и структурные характеристики. Переработка ускоряет процесс смерзания снега.

Технология переработки снега заключается в использовании зубьевых или дисковых борон, измельчающе-перемешивающих устройств (пульвемиксеров), роторных снегоочистителей. После применения этих устройств необходимо как можно скорее провести уплотнение снега, с тем чтобы он не успел смерзнуться, и энергия, затрачиваемая на уплотнение, не расходовалась на разрушение связей.

Снежные дороги с ледяным покрытием применяются тогда, когда описанные выше методы не позволяют достигнуть требуемой условиями эксплуатации качества дорожного покрытия. При возведении таких дорог сначала строится дорога из уплотненного снега, а затем на подготовленную поверхность подается вода,

формирующая твердое полотно из льдистого снега, которое пригодно для движения транспорта. На рис. 8.5 представлен график, по которому можно определить толщину слоя воды, добавляемой в снег заданной температуры и плотности.

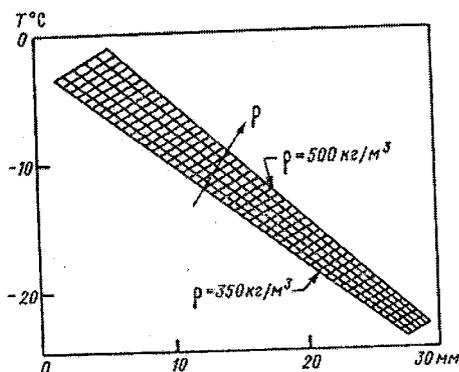


Рис. 8.5. Толщина слоя воды, добавляемой в снег:
 ρ — плотность снега; T — температура снега.

Ледяные дороги возводятся в тех районах, где имеется недостаток снега. При сооружении таких дорог вода разбрызгивается или наливается непосредственно на грунт. По мере нарастания льда на необходимую для эксплуатации дороги толщину основное внимание уделяется сглаживанию неровностей дороги. Над наиболее выступающими над поверхностью кочками и буграми должно образоваться несколько сантиметров льда.

Ледяные дороги могут возводиться с помощью заранее заготовленных ледяных блоков. В этом случае блоки выкладываются по полотну дороги, а стыки между ними заливаются водой.

Зимой в труднодоступных районах часто используют замерзшую поверхность рек, озер и болот для организации движения транспортных средств. Сначала необходимо убедиться в том, что несущая способность ледяного покрова достаточна для безопасной эксплуатации дороги. Важнейшей характеристикой в оценке несущей способности ледяного покрова является его толщина. Наиболее достоверным является определение толщины льда при непосредственном измерении во время бурения лунок. Предваритель-

ная оценка толщины h может быть выполнена на основании уравнения Стефана:

$$h = \alpha \sqrt{\theta},$$

где $\alpha = 0,58 - 0,95$ – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние внешних условий (толщины слоя снега, скорости течения реки и т.п.) на рост толщины льда; θ – число градусо-дней при температуре ниже 0°C .

Предельная нагрузка P , которую может выдержать ледяной покров, задается эмпирической формулой

$$P = Ah^2,$$

где A – эмпирический коэффициент.

Для практических целей применяются еще более простые эмпирические формулы:

– для гусеничных машин $h = 9\sqrt{p}$,

– для колесных машин $h = 11\sqrt{p}$.

В этих формулах толщина льда определяется в см, p – масса машин в тоннах.

В оценке безопасности движения транспорта по льду замерзших водоемов помимо статической грузоподъемности ледяного покрова необходимо учитывать его динамические свойства. При движении подвижной нагрузки в системе лед – вода возникают изгибно-гравитационные волны, характеризующиеся определенной, зависящей от характеристик льда, скоростью распространения. Если скорость движения транспорта совпадает со скоростью распространения изгибно-гравитационных волн, то возникает явление резонанса, которое приводит к разрушению ледяного покрова. При этом движущийся автомобиль проваливается под лед.

В зимнее время часто используются ледяные переправы. Такие переправы могут быть проложены непосредственно по льду водоема, либо могут быть выполнены работы по предварительному укреплению полотна переправы. Для этого на полотне переправы может быть наращен искусственный лед, который часто армируют. По поверхности переправы укладывается деревянная гать или заменяющие ее современные покрытия.

8.3. Методы борьбы с ледовыми проблемами

В своей хозяйственной деятельности человек сталкивается и с вредными проявлениями льда и снега. Для борьбы с ними разработаны эффективные технологии. Ниже будут рассмотрены некоторые из них.

Наибольшее число затруднений связано с тем, что наличие льда и/или снега не позволяет выполнять те или иные виды деятельности человека. Например, снежные наносы или наледи на железных и автомобильных дорогах, подтопление территории из-за зажоров на реках, лавинная опасность.

С давних времен человек разрабатывает различные орудия для борьбы со снежными заносами. Одной из первых была предложена лопата с широким совком. Сейчас имеется широкий спектр различных механических устройств, позволяющих эффективно убирать снежные наносы. На рис. 8.6 представлена классификация таких устройств.

Плужные снегоочистители являются наиболее распространенным типом снегоуборочного оборудования. Чаще всего плуг привешивают впереди транспортного средства. Одноотвальные снежные очистители отбрасывают снег в одну сторону, а поворотные – в любую. Основным недостатком плужных снегоочистителей является небольшая дальность отбрасывания снега, а также невозможность очистки ими крупных заносов и заносов из слежавшегося снега. В этих условиях используются роторные снегоочистители, в которых снег дробится на комки разных размеров, а затем отбрасывается в сторону. Используются роторные машины с одним и несколькими устройствами. На рис. 8.7 представлены две схемы конструкции рабочего органа одноэлементного роторного снегоочистителя.

Для очистки от снега взлетно-посадочных полос аэродромов часто применяют щеточные снегоочистители. Иногда различные принципы уборки снега совмещают в одном устройстве. Так, плужный снегоочиститель совмещают с роторным барабаном.

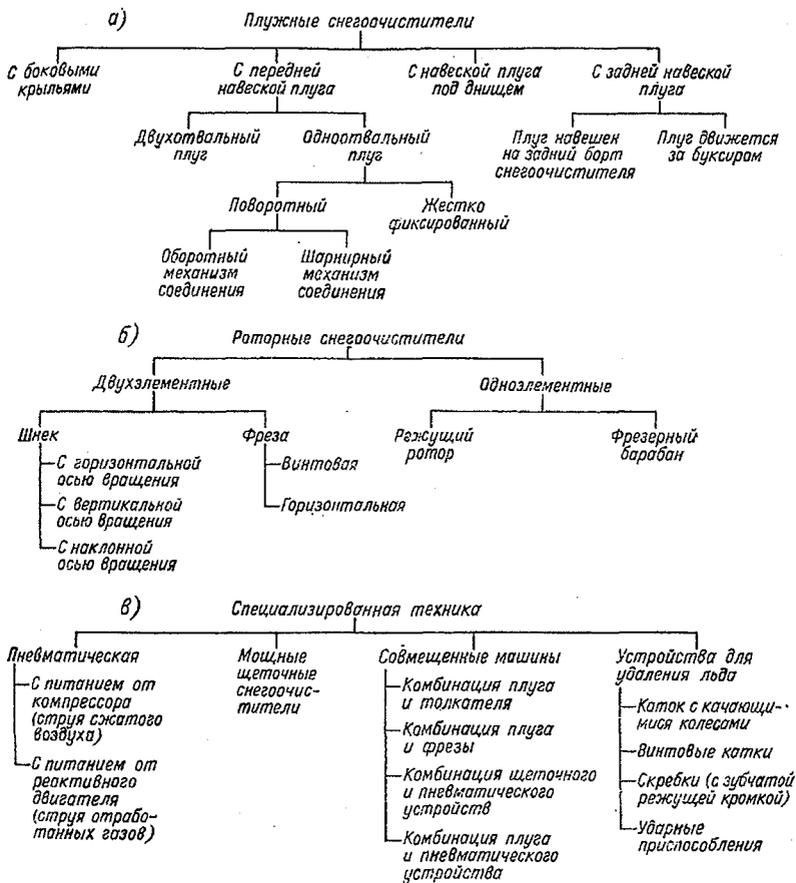


Рис. 8.6. Классификация устройств для уборки снега.

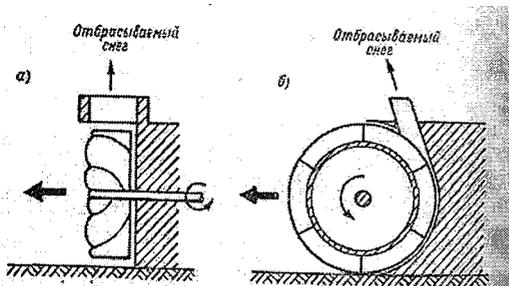


Рис. 8.7. Конструкции роторного снегоочистителя:
 а – режущий ротор;
 б – фрезерный барабан;
 жирной стрелкой показано направление движения снегоочистителя.

Мы уже рассматривали, как при разработке открытых карьеров используются свойства искусственного снега для подавления пылеобразования и улучшения экологической ситуации. В то же время, занесение снегом карьерных пространств является одним из главных препятствий для проведения добычных работ. На разработку технологий борьбы с этими заносами было потрачено много усилий. В результате проведенных исследований рекомендовано ориентировать продольную ось карьера вдоль господствующего направления метелевого переноса или сведение угла между ними к минимуму. Продольное продувание карьера способствует выносу снега из него. Этот вывод подтвержден данными натуральных наблюдений и результатами модельных экспериментов в аэродинамических трубах. Конструктивные решения позволяют снизить заносимость карьеров снегом. Для очистки же карьеров от снега используется самая совершенная снегоочистительная техника.

В горных районах основной опасностью являются снежные лавины. Изучение этого природного явления уже давно сформировалось в отдельную науку – лавиноведение, в которой это явление рассматривается с различных точек зрения (географической, физической, технической и т.п.). В своем техническом аспекте лавиноведение рассматривает различные технические методы борьбы с лавинной опасностью.

Для защиты железных и автомобильных дорог могут применяться сооружения кровельного типа – противолавинные галереи. Результаты проведенных исследований показывают, что обязательным условием нормальной эксплуатации галерей является создание на их крыше амортизирующего грунтового покрытия – засыпки, которое снижает динамическое давление лавины и уменьшает вероятность повреждения галереи. На рис. 8.8 представлена противолавинная галерея, где показана схема сил, действующих на галерею при прохождении снежной лавины.

Большой эффективностью характеризуются бетонные лавинорезы, возведенные в комплексе с со снегоотводящей стенкой. Эффективность этого и других противолавинных устройств может быть значительно уменьшена, если при их проектировании допущены ошибки, с оценкой дальности выноса и мощности лавин.

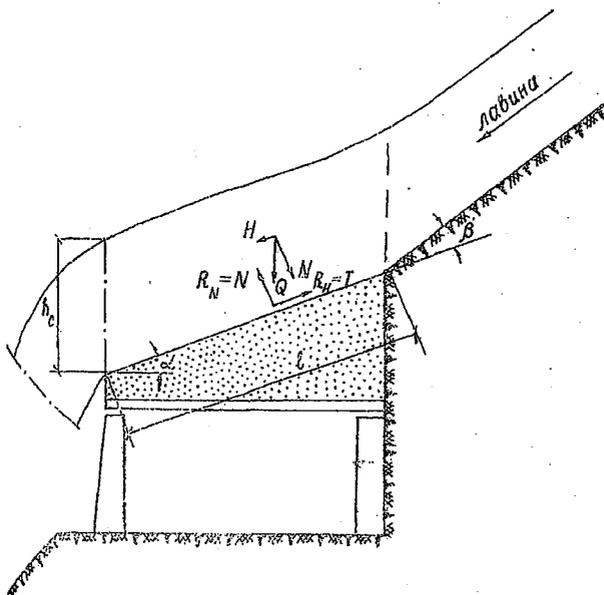


Рис. 8.8. Схема сил, действующих на противолавинную галерею.

Ледяной покров оказывает негативное влияние на работу речных гидротехнических сооружений. Одной из главных проблем, с которой сталкиваются проектировщики таких сооружений, является необходимость обеспечения пропуска льда через сооружение без образования заторов. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в нашей и других стране, позволили понять основные процессы, происходящие при взаимодействии льда с сооружениями. В соответствии с современными представлениями остановки льда у сооружения не будет, если кинетическая энергия раздробленных масс льда, находящихся в активной части потока, будет достаточна для разрушения ближайших к опорам льдин. Это теоретическое положение позволяет определить достаточные размеры пролета. Так, минимальная величина пролета моста, обеспечивающая беззаторный пропуск льда, определяется по формуле

$$l > \frac{0,07KB}{Pv_0^2},$$

где K – удельное давление льда, кН/м^2 ; B – ширина опоры; v_0 – поверхностная скорость течения, м/с ; P – плотность ледохода.

Аналогичные выражения получены для пропуска льда через гребенки плотин и водосливные отверстия.

Еще одной проблемой, которая возникает при зимней эксплуатации гидротехнических сооружений, является обмерзание сороудерживающих решеток, затворов и их закладных частей, захватных балок, трубопроводов, бетонных поверхностей. Обмерзание может возникать в двух случаях: от внутриводного и от поверхностного льда. В первом случае забивание решеток происходит из-за прилипания к стержням частичек и комков шуги, образования на них донного льда. Во втором случае решетка забивается приплывающими кусками ледяного покрова.

Основным методом борьбы с обмерзанием является обогрев. Механические методы борьбы с обмерзанием, а также применение специальных покрытий поверхности уменьшающих адгезию льда и химических средств не всегда бывают эффективны. Следует иметь в виду, что обогрев не может предотвратить механическое забивание решеток. Он предотвращает кристаллизацию переохлажденной воды и прилипания шуги. Обогрев должен включаться до начала процесса переохлаждения воды, так как на поверхности решетки поддерживается температура более высокая, чем температура кристаллизации воды.

Ледяной покров может оказывать давление на гидротехнические сооружения при изменении температуры воздуха. Это давление возникает из-за термического расширения льда. Термическое расширение пресноводного и морского льда протекают по-разному. Расширение пресноводного льда происходит при повышении температуры воздуха, а морского при ее понижении.

Статическое давление ледяного покрова p_n при его тепловом расширении возникает, когда свободному расширению льда препятствуют берега или сооружения. Оно может быть рассчитано по формуле

$$p_h = p_0 h_I + 4 \int_0^{h_I} \alpha_I \eta_I \frac{\partial t}{\partial \tau} dz,$$

где p_0 – напряжение, соответствующее предельной упругой деформации льда; h_I – толщина ледяного покрова; α_I – коэффициент линейного теплового расширения льда; η_I – коэффициент вязкости льда; t – температура льда; τ – время. Как следует из этой формулы давление, оказываемое льдом на препятствие, зависит от скорости изменения вертикального профиля температуры внутри ледяного покрова.

Лед может образовываться и в замкнутых полостях, при этом теоретически могут возникать значительные давления вплоть до 209 МПа при температуре $t = -22$ °С. Эта точка соответствует фазовому переходу льда модификации *I* (обычный лед) в лед модификации *III*. Столь высокое давление может приводить к полостям, в которых образуется лед. Явление образования пресного льда в замкнутых полостях было подробно исследовано А.И. Пеховичем и его сотрудниками. Ими же предложены методы расчета возникающих при замерзании давлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авдеев Б.А.* Техника определения механических свойств материалов. – М.: Машиностроение, 1965. – 488 с.
2. *Богородский В.В., Гаврило В.П.* Лед. Физические свойства. Современные методы в гляциологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 384 с.
3. *Брок Д.* Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
4. *Войтковский К.Ф.* Механические свойства снега. – М.: Наука, 1977. – 126 с.
5. Конструкционные материалы. Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. – 686 с.
6. Материаловедение. / А.М. Аласкин, Ю.Е.Седов, А.К.Онегина, В.Н.Климов; под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высшая школа, 2005. – 456 с.
7. Морской лед. Сбор и анализ данных наблюдений, физические свойства и прогнозирование ледовых условий. (Справочное пособие). Под ред. И.Е. Фролова и В.П. Гаврило. – СПб.: Гидрометеоздат, 1997. – 402 с.
8. *Никулин Н.В.* Электроматериаловедение. – М.: Высшая школа, 1989. – 190 с.
9. *Партон В.З.* Механика разрушения: от теории к практике. – М.: Наука, 1990. – 240 с.
10. *Погодина-Алексеева К.М.* Металловедение и термическая обработка. – М.: Высшая школа, 1966. – 228 с.
11. *Сазонов К.Е.* Материаловедение. Руководство к лабораторным работам. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2006. – 96 с.
12. Снег. Справочник. Под ред. Д.М. Грея и Д.Х. Мэйла. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 751 с.
13. *Степанюк И.А.* Технологии испытания и моделирования морского льда. – СПб.: Гидрометеоздат, 2001. – 78 с.
14. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. – М.: Наука, 1979. – 560 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
ЧАСТЬ I. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕКТРО-МАТЕРИАЛЫ	5
1. Механические свойства материалов	5
1.1. Основные понятия механики сплошной среды	5
1.2. Диаграммы растяжения – сжатия материалов	11
1.3. Современные концепции прочности материалов. Основные понятия теории трещин	19
1.4. Усталость и ползучесть материалов	25
2. Технологии испытаний материалов	28
2.1. Испытания на растяжение – сжатие	32
2.2. Испытания на кручение	35
2.3. Испытания на изгиб	37
2.4. Испытания на ударную прочность	39
2.5. Испытания на выносливость (усталостную прочность)	41
2.6. Испытания на твердость	43
2.7. Определение трещиностойкости материалов	46
2.8. Определение модулей упругости	48
3. Основные виды материалов, применяемых в морских технологиях	50
3.1. Сплавы железа и углерода	50
3.2. Цветные металлы и их сплавы	61
3.3. Композитные материалы	68
3.4. Неметаллические материалы	73
3.5. Наноматериалы	77
4. Морская коррозия	79
4.1. Основные виды коррозии	79
4.2. Анодный и катодный процессы	82
4.3. Океан как коррозионная среда	88
4.4. Методы защиты от коррозионного воздействия	90
5. Электроматериалы	94
5.1. Проводниковые материалы	95
5.2. Полупроводниковые и диэлектрические материалы	105
5.3. Магнитные материалы	109
ЧАСТЬ II. ЕСТЕСТВЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ЛЕД И СНЕГ	113
6. Лед и снег как природные материалы	113
6.1. Пористость и плотность	116
6.2. Теплофизические и радиационные свойства	119
6.3. Механические свойства	133
7. Искусственный лед и снег	151
7.1. Получение гранулированного льда	151

7.2. Композитные материалы с ледяной матрицей	159
7.3. Моделированный лед	168
8. Технология использования льда и снега в хозяйственной деятельности и методы борьбы с ледовыми проблемами	173
8.1. Сферы использования льда в хозяйственной деятельности	173
8.2. Зимники и ледяные переправы	180
8.3. Методы борьбы с ледовыми проблемами	186
Л и т е р а т у р а	192

Учебное издание

Кирилл Евгеньевич Сазонов

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ.
ЛЕД И СНЕГ

Учебное пособие

Редактор Т.В. Иващенко

ЛР № 020309 от 30.12.96.

Подписано в печать 26.06.07. Формат 60×90 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ.л. 16,2. Тираж 250 экз. Заказ № 52/07
РГТУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
ЗАО «НПП «Система», 195112, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 80/2.

135-30