

С.В. Ржевская

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Издание 4-е, переработанное и дополненное

*Допущено Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся в области техники и технологии*



Москва
«Логос»
2004

УДК 622:620.2

ББК 30.3

P48

*Федеральная целевая программа «Культура России»
(подпрограмма «Поддержка полиграфии и книгоиздания России»)*

Р е ц е н з е н т ы:

Б.А. Гурович – д-р техн. наук, проф., нач. лаборатории
Российского научного центра «Курчатовский институт»

В.С. Соколов – канд. техн. наук, доц., и.о. зав. кафедрой
«Материаловедение» Академии химического машиностроения

Ржевская С.В.

M54 **Материаловедение: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. –**
М.: Логос, 2004. – 424 с.
ISBN 5-94010-307-3

На единой физической основе рассматривается взаимосвязь состава, строения, структуры и свойств различных материалов, а также их изменения под воздействием внешних факторов. Представлены все виды материалов, использующихся в промышленности, причем по конкретным материалам приведены сведения о составе, строении, структуре, основных физических и потребительских свойствах, классификации, маркировке и способах воздействия на свойства. Рассмотрены способы защиты материалов от коррозии и изнашивания.

Для студентов вузов, обучающихся по инженерно-техническим специальностям и направлениям. Может быть полезна аспирантам и инженерам.

ББК 30.3

ISBN 5-94010-307-3

© Ржевская С.В., 2004

© «Логос», 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

«Материаловедение» — одна из основных дисциплин, определяющих уровень подготовки бакалавров во всех средних и высших учебных заведениях. Значение этой дисциплины определяется широким диапазоном материалов, используемых в практической деятельности во всех отраслях народного хозяйства. Достаточные знания, полученные в области материаловедения, должны обеспечивать в производственных процессах рациональное, эффективное использование материалов при соблюдении требований экономики, экологии и безопасности труда.

Важнейшая цель современных горнодобывающих и обогащательных предприятий — повышение качества и снижение себестоимости всех видов продукции — может быть решена на базе обязательного знания свойств используемых материалов для правильного выбора технических средств, их эксплуатации и восстановления, а также ведения добычных, обогащательных, строительных и ремонтно-восстановительных работ.

Изучение курса «Материаловедение» должно обеспечить решение следующих задач при подготовке бакалавров в области горного дела:

- получить прочные знания об основных закономерностях, определяющих строение и свойства материалов, о методах их обработки, о поведении материалов в основных процессах эксплуатации или потребления;
- научить выполнять наиболее широко применяемые в технике методы испытания качества материалов;
- дать навыки самостоятельного пользования нормативной документацией (НД) и справочной литературой для выбора основных промышленных, а также новых перспективных материалов и эффективных методов их использования в зависимости от условий.

Учебник поможет будущим инженерно-техническим работникам увязать свои теоретические знания с практической работой и облегчит понимание специальной литературы по материаловедению, а специалистам, имеющим практический опыт работы, даст возможность обновить теоретические знания.

Автор, не претендуя на исчерпывающую полноту изложения всех вопросов материаловедения, стремится последовательно на современном научном уровне в доступной форме изложить необходимый объем знаний, предусмотренных программой дисциплины «Материаловедение» и учебными планами специальностей. Первая глава дает представление о взаимосвязях состава, строения и свойств различных материалов, способов воздействия на материалы для получения требуемого комплекса свойств. Каждая последующая глава объединяет информацию об определенной группе материалов, что позволяет выявить общие закономерности их структуры и свойств. Более мелким шрифтом в учебнике приведены необходимые справочные и информационные сведения. Курсивом выделены признаки классификаций и термины, при их первом использовании в тексте, а полужирным — если они приведены как часто используемые в глоссарии. Термины, определения и признаки классификаций даны на основе соответствующей нормативной документации.

Автор признателен коллегам за их замечания, которые способствовали совершенствованию учебника и выражает глубокую благодарность проф., д.т.н. Ю.А. Скакову, доц., к.т.н. К.И. Шаховой и доц., к.т.н. Н.Б. Шубиной за целый ряд ценных советов.

ВВЕДЕНИЕ

1. Основные понятия

В практической деятельности нас окружают вещества.

Вещество — вид материи, совокупность дискретных (прерывных) образований (атомы, молекулы и то, что из них построено), обладающих массой покоя.

Существование веществ в инженерной практике можно охарактеризовать некоторым жизненным циклом, включающим постановку задачи использования; научно-исследовательскую работу; проектно- и опытно-конструкторские работы; технологическую подготовку производства; изготовление; испытание; эксплуатацию или потребление, хранение, транспортирование, восстановление или ремонт и др.

В зависимости от стадии жизненного цикла вещество рассматривается как сырье, материал или изделие.

Сырье — вещество, предназначенное для дальнейшей переработки.

Материал — вещество, предназначенное для изготовления чего-нибудь. В производственных процессах материалы рассматривают в зависимости от их роли как *основные* и *вспомогательные*.

Материалы основные — материалы, которые непосредственно расходуются на изготовление продукции и составляют ее главное вещественное содержание.

На предприятиях горнодобывающей промышленности к основным материалам, по существу, относятся только материалы, затрачиваемые на производство запасных частей, металлических изделий, тары и т.д. Принципиальное отличие горного дела от других отраслей состоит в том, что основным материалом для него являются полезные ископаемые.

Материалы вспомогательные — материалы, применяемые для производства, но не входящие в состав продукции. На горных предприятиях к вспомогательным материалам относятся почти все потребляемые материалы (лесные материалы, взрывчатые вещества, смазочные масла, топлива и др.).

Изделие (продукция) — конечный результат человеческого труда (обработки, переработки, исследования и т.п.).

2. Значение, цели и задачи дисциплины «Материаловедение». Взаимосвязь с другими дисциплинами

Материаловедение — наука, изучающая в общей связи состав, строение, структуру и свойства материалов, а также закономерности их изменения под тепловым, химическим, механическим и другими воздействиями.

Состав материала — количественная характеристика содержания в нем компонентов. Составы различают по природе компонентов. Так, рассматривают химический, минеральный и другие составы.

Химический состав — количественная характеристика содержания в нем химических элементов или их соединений (например, оксидов).

Минеральный состав — количественная характеристика содержания минералов в каменном материале.

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

Строение материала — совокупность устойчивых связей вещества, обеспечивающих его целостность и тождественность самому себе, т.е. сохранение основных свойств.

Структура материала — форма, размеры и характер взаимного расположения образующих его компонентов.

Свойство материала — признак, составляющий его отличительную особенность.

Задачами изучения материаловедения являются установление связей состава, строения и структуры материалов с их свойствами и на этой основе формирование и сохранение необходимых свойств.

Основная практическая задача материаловедения в области горного дела — выбор материала, обладающего заданным комплексом свойств, и его рациональное использование для повышения эффективности технологических процессов. Содержание дисциплины базируется на знании общетехнических дисциплин: химии, физики, термодинамики, физической химии, а также большого числа специальных, как, например, термической обработки.

3. Общие требования, предъявляемые к материалам в зависимости от условий использования или эксплуатации

Возможность использования материала определяется его составом, строением, структурой и, следовательно, свойствами. При этом требования, предъявляемые к материалам в промышленности в зависимости от условий их использования, эксплуатации или потребления, определяются понятием «*качество материала*».

Качество материала — совокупность его свойств, обуславливающих возможность удовлетворять определенные потребности в соответствии с его назначением.

Во всех странах задача обеспечения качества, в том числе продукции, имеет важнейшее значение и рассматривается на государственном уровне. Существуют следующие виды обеспечения качества: научное; организационное; нормативно-техническое; метрологическое; информационное; правовое; материально-техническое.

Материаловедение — это вид научного обеспечения качества веществ и материалов.

Организационное обеспечение решается органами Госстандарта России, в задачи которого входит руководство такими органами, как, например, Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов.

Стандартные образцы веществ и материалов — осязаемые объекты. Во многих случаях это прототипы либо образцы коммерческих материалов — цемента, стали, стекла — с аттестованным составом. Иногда это природные вещества, например горные породы, почва или ткани растений.

Изначально стандартные образцы веществ и материалов применялись для контроля качества в промышленности, особенно в отраслях, связанных с металлообработкой. В ряде случаев стандартные образцы веществ и материалов помогали заключению торговых сделок. Пример такого рода — продажа железной руды, количество которой исчисляется миллионами тонн, а цена прямо связана с содержанием железа. Отклонение концентрации железа в руде примерно на 0,1% увеличивает или уменьшает стоимость груза крупного рудовоза на тысячи условных единиц (у.е.).

Надежные измерения химического состава стандартных образцов веществ и материалов способствуют принятию важных решений в случае:

- определения пригодных материалов и готовой продукции для производств, где химический состав продукции регламентирован;
- контроля состояния здоровья и профилактики болезней, например при профессиональных заболеваниях;
- выявления возможности нарушения закона, например при анализе выхлопных газов автомобилей и сравнении результатов со стандартными образцами;
- установления совершения преступления при судебной экспертизе.

Для регистрации стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, типы которых признаны в качестве межгосударственного стандартного образца (МСО) стран СНГ, предназначен Реестр МСО. Он является источником официальной информации о результатах создания и признания типов МСО.

Создание стандартных образцов веществ и материалов — дело дорогостоящее и к тому же требует широких технических знаний и большого опыта. Разработка новых стандартных образцов веществ и материалов почти всецело определяется рыночным спросом.

В мире насчитывается 20 тыс. стандартных образцов веществ и материалов. Компьютерный банк данных «Кодекс образцовых веществ» (COMAR) содержит информацию о 12 тыс. таких образцов из 20 стран. В базу данных включены: название и общее описание вещества, название и адрес изготовителя, форма вещества, аттестованные свойства, их значения и область применения. Центры кодирования COMAR действуют в 14 странах. Необходимую информацию можно получить на Web-сайте и в центральном секретариате COMAR.

Нормативно-техническое и метрологическое обеспечение качества также решаются государственной системой стандартизации на основе систем стандартов, в число которых входят: государственная система стандартизации (ГСС); система показателей качества (СПК); государственная система обеспечения требуемой точности и единства измерений (ГСИ); государственная система стандартных справочных данных (ГС ССД) и др.

ГСИ и ГС ССД широко используют образцовые вещества и химические эталоны, что формирует основу единства измерений и обеспечивает точность результатов, калибровку оборудования, мониторинг лабораторий и методов оценки, а также способствует сличению методов при использовании этих веществ в качестве эталонов сравнения. Они должны быть четко маркированы, что позволяет проводить их однозначную идентификацию со ссылкой на соответствующие сертификаты и другую документацию

Обязательные требования к качеству продукции, в том числе веществ и материалов, разрабатываются на основе показателей СПК. Они включены в государственные стандарты Российской Федерации — стандарты на продукцию.

На продукцию разрабатывают стандарты *общих технических условий*, которые содержат общие требования к группам однородной продукции, и *технических условий*, которые содержат требования к конкретной продукции.

Стандарт общих технических условий в общем случае содержит следующие разделы:

- 1) классификация, основные параметры и (или) размеры;
- 2) общие технические требования;
- 3) требования безопасности;
- 4) требования охраны окружающей среды;
- 5) методы контроля;
- 6) правила приемки;
- 7) транспортирование и хранение;
- 8) указания по эксплуатации (ремонту, утилизации);
- 9) гарантии изготовителя.

Номенклатуру, состав, содержание и наименование разделов (подразделов) определяют в соответствии с особенностями стандартизируемой продукции и характером предъявляемых к ней требований.

Стандарт технических условий устанавливает для одной или нескольких, например, марок, сортов, видов конкретной продукции всесторонние требования, соблюдение которых должно обеспечиваться при ее производстве, поставке, потреблении (эксплуатации), ремонте и утилизации.

Окончательная оценка пригодности тех или иных материалов для конкретного использования ведется на основании натуральных испытаний, установленных требованиями государственных стандартов.

Задачи информационного обеспечения качества веществ и материалов решает Всероссийский научно-исследовательский центр стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ Госстандарта России (ВНИЦ СМВ). Последний располагает информационным центром стандартов, который комплектуется таблицами рекомендуемых и стандартных данных по свойствам материалов и веществ, методикам ГС ССД, паспортами безопасности материалов и веществ, копиями аттестатов аккредитации органов по сертификации испытательных лабораторий (центров), государственными реестрами и копиями сертификатов соответствия (безопасности) на продукцию. Кроме того, в этом центре имеются авторские свидетельства об изобретении (разделы по материалам, веществам и методы их получения).

Правовое обеспечение качества гарантируется основными законами Российской Федерации, и в первую очередь Законом о защите прав потребителей.

Материально-техническое обеспечение качества определяется условиями производства и обращения материалов.

4. Системный подход к изучению строения, структуры и свойств материалов

Различные материалы можно рассматривать по происхождению, виду сырья, способу получения, назначению, особым свойствам и другим признакам. В настоящее время наибольшее распространение получила систематизация материалов, которую можно назвать отраслевой, так как в ее основу положено наименование одной из отраслей народного хозяйства, непосредственно связанной с производством или применением данного материала: полезные ископаемые; нефтяные продукты; металлы; электротехнические материалы; стройматериалы; силикатно-керамические и углеродные материалы; лесоматериалы, целлюлоза, бумага, картон; химические продукты и резиноасбестовые изделия; химические волокна; текстильные и кожевенные материалы и др.

К сожалению, данная систематизация не позволяет не только установить взаимосвязи состава, строения, структуры и свойств материалов, но в ряде случаев даже однозначно отнести материал по принадлежности к той или иной группе.

Наибольшие возможности для решения задач материаловедения предоставляет систематизация веществ по их агрегатным состояниям в нормальных (по температуре и давлению) условиях. При этом внутри каждой группы (твердое, жидкое или газообразное вещество) есть возможность учесть вид образующих его частиц, состав, физическую природу, строение и структуру, а также происхождение.

Такая систематизация (рис. 1) позволяет решать главную задачу материаловедения — выбор материала с заданными свойствами для наи-

более эффективного использования в инженерной практике, поскольку положение вещества в схеме не только однозначно отвечает на вопрос о свойствах, но и дает возможность получить рекомендации по улучшению этих свойства стандартным набором технологических операций.

Именно такое системное представление положено в основу настоящего учебника.

Системное представление вещества:

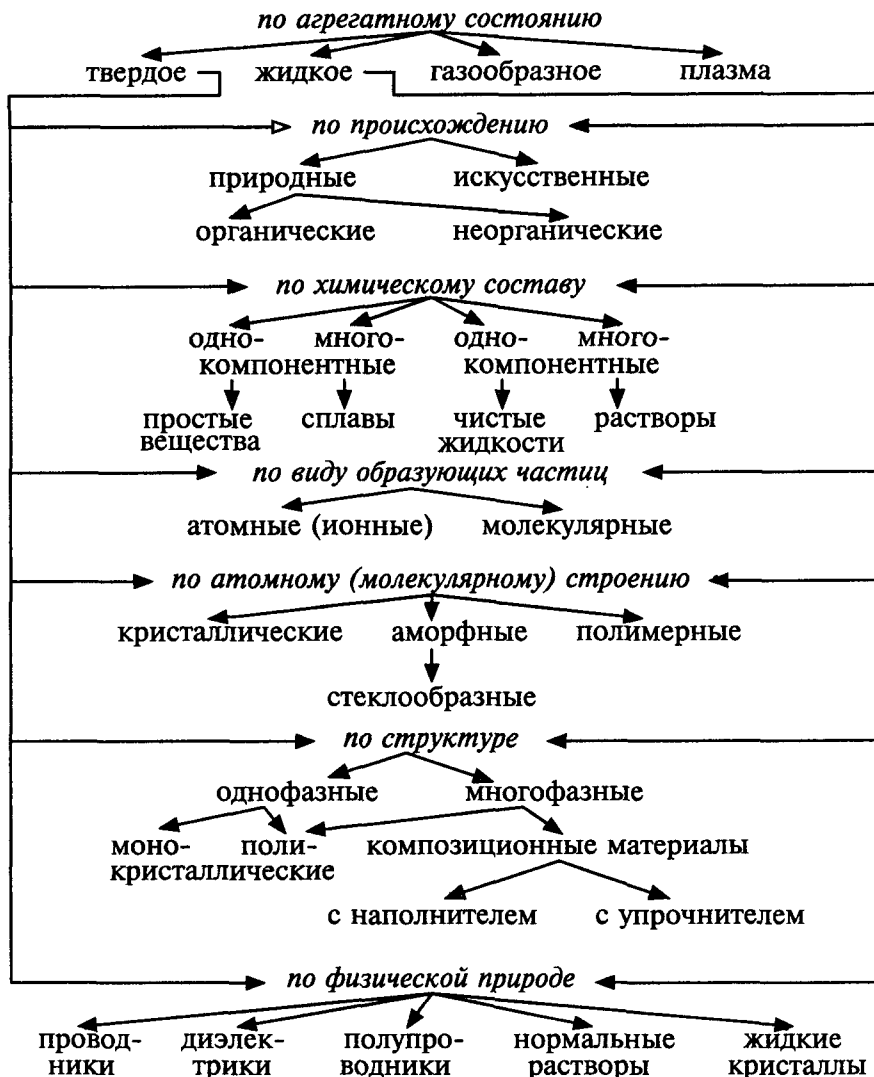


Рис. 1. Системное представление веществ по их происхождению и агрегатному состоянию

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О СТРОЕНИИ, СТРУКТУРЕ И СВОЙСТВАХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Агрегатные состояния вещества

1.1.1. Общие сведения

По происхождению (генезису) вещества и материалы делят на *природные* и *искусственные*.

Генезис — происхождение, возникновение; в широком смысле — момент зарождения и последующий процесс развития, приведший к определенному состоянию, виду, явлению.

Природные материалы получают непосредственно из природного сырья путем механической обработки, но без изменения первоначального химического состава и структуры. Эти материалы сохраняют основные свойства исходного сырья. Например, природный песок, который перед употреблением только очищают от примесей и в отдельных случаях сортируют по размеру зерен.

Искусственные материалы, получаемые после специальной переработки природного или искусственного сырья, по физико-химическим свойствам значительно отличаются от исходного сырья. Так, из глины, легко размокающей в воде, получают после формования и обжига водостойкие керамические материалы (кирпич, облицовочные плитки).

По своему *агрегатному состоянию* все вещества и материалы подразделяют на твердые, жидкие и газообразные. Каждое агрегатное состояние характеризуется определенным строением вещества и, соответственно, свойствами. Четвертым агрегатным состоянием часто считают плазму.

Агрегатные состояния вещества — состояния одного и того же вещества (вода, железо, сера и др.), переходы между которыми сопровождаются скачкообразным изменением ряда физических свойств (например, плотности).

Все вещества, за некоторым исключением, могут существовать в каждом из трех агрегатных состояний. Реализация того или иного агрегатного состояния вещества зависит от физических условий, в которых оно находится, — главным образом от температуры и давления. Так, дистиллиро-

ванная вода при нормальном давлении $p = 101\,325$ Па и температуре $t = 0^\circ\text{C}$ кристаллизуется в лед, а при 100°C кипит и превращается в пар.

Изменение агрегатных состояний сопровождается подводом или выделением энергии, что отвечает переходам, соответственно, к агрегатным состояниям с более высокой или более низкой температурой.

Твердое состояние вещества — это агрегатное состояние вещества, характеризующееся стабильностью формы. Вещества в твердом состоянии называют **твердыми**. По химическому составу их делят на *одно-* (простые) и *двух-*(и более)*компонентные сплавы*, а в зависимости от внутреннего строения разделяют на *кристаллические* и *аморфные*.

Компонент — составная часть, элемент, в данном случае химический.

Кристаллические вещества — это вещества в твердом состоянии, для которых характерно *кристаллическое строение*, т.е. периодическое трехмерное расположение атомов (молекул).

Кристаллические вещества могут существовать в виде *кристаллов*, а также *поликристаллических (поликристаллов)*, *камневидных* и *разрыхленных агрегатов*.

Кристаллы — состояние твердых веществ, приобретающих при равновесных условиях образования естественную форму правильных многогранников, отражающую симметрию атомного строения, и обладающих *анизотропией* физических свойств. Крупные одиночные кристаллы называются *монокристаллами*.

Анизотропия — различие значений свойств (деформационных, электрических, магнитных, тепловых, оптических и др.) в материале по разным направлениям.

Поликристаллы — агрегаты из большого числа отдельных беспорядочно ориентированных мелких кристаллов (кристаллитов), связанных между собой силами сцепления, которые обычно слабее внутрикристаллических. Большинство твердых материалов являются поликристаллами. Таковы, например, технические металлы и сплавы, многие материалы из горных пород.

Камневидные агрегаты — это агрегаты из большого числа отдельных, беспорядочно ориентированных мелких кристаллов, связь между которыми осуществляется вяжущим (цементирующим) веществом.

Поликристаллы и камневидные агрегаты в целом изотропны по физическим свойствам.

Разрыхленные (раздельно-зернистые, дисперсные) агрегаты — это механическая смесь частиц (кусков, зерен), не связанных между собой. Примером разрыхленных агрегатов являются песок, гравий, цемент.

Разрыхленные агрегаты образуются в результате разрушения (разрыхления, дробления, измельчения) поликристаллических или камневидных агрегатов. Разрыхление, дробление и измельчение характеризуют стадии разрушения по крупности получаемых агрегатов. При этом измельчение (диспергирование) твердого тела, по существу, представляет собой поверх-

ностное явление, так как выражается в создании новой поверхности раздела. При достаточно большой суммарной поверхности в измельченных материалах процессы растворения, коррозии, испарения, конденсации, кристаллизации определяются величиной и свойствами этой поверхности.

Дисперсность — характеристика размера частиц (степени измельчения) какого-либо тела в дисперсных агрегатах. Мера дисперсности — отношение общей поверхности всех частиц к их суммарному объему.

При размерах частиц 1...100 нм (ультрадисперсное состояние) обнаруживаются все особенности поверхностных состояний, так как в данном случае теряется понятие объема. Ультрадисперсное состояние является неравновесным. Дисперсные частицы могут образовывать хлопья и сrostки, на их поверхности часто происходят химические превращения. Так, диспергирование применяют, например, при подготовке материалов для изготовления изделий по порошковой технологии, в производстве минеральных вяжущих веществ, пигментов, наполнителей полимерных материалов и др.

Аморфные вещества — это вещества в твердом состоянии, строение которых обуславливает изотропию физических свойств и отсутствие точки плавления (переход из твердого состояния в жидкое происходит постепенно). В природе аморфное строение вещества менее распространено, чем кристаллическое. Аморфное строение характерно, например, для опала, обсидиана, янтаря, смолы, битума и полимеров. Кристаллическое строение вещества может быть переведено в аморфное строение различными видами физического и химического воздействий. Из раствора кристаллического вещества можно получить высушенный гель, из расплава — стекло, из пара — аморфный осадок и т.п. Так, с аморфным строением искусственно получен ряд металлов (металлическое стекло), а также полупроводники (аморфные полупроводники).

Особым видом состояния твердых веществ с аморфным строением является *стеклообразное состояние*.

Стеклообразное состояние вещества — агрегатное состояние вещества с аморфным строением, формирующееся при затвердевании переохлажденного расплава и обладающее в результате постепенного увеличения вязкости механическими свойствами твердых тел. Переход из стеклообразного состояния в расплав и из расплава в стеклообразное состояние характеризуется температурным интервалом. Обратимость этого перехода является особенностью, которая отличает стеклообразное состояние от других аморфных.

В стеклообразном состоянии может находиться значительное число простых веществ (S, Se, As, P), оксидов (B_2O_5 , SiO_2 , GeO_2), водных растворов (H_2O_2 , H_2SO_4 , H_3PO_4), халькогенидов ряда элементов (As, Ge, P), некоторых галогенидов и карбонатов. Многие из этих веществ составляют основу сложных по составу неорганических стекол.

Жидкое состояние вещества (жидкость) — агрегатное состояние вещества, обладающее свойством течь и принимать форму сосуда, в котором оно находится.

Жидкостям присущи некоторые черты твердых (они сохраняют свой объем, образуют поверхность, обладают определенной прочностью на разрыв) и газообразных (принимают форму сосуда, в котором находятся; могут непрерывно переходить в газ) веществ; в то же время они обладают рядом только им присущих особенностей, из которых наиболее характерная — текучесть.

Жидкости можно классифицировать *по химическому составу и по физической природе*.

По химическому составу различают *однокомпонентные жидкости — чистые жидкости* и *двух- или многокомпонентные жидкие смеси — растворы*. Практически все жидкости, встречающиеся в природе, представляют собой растворы.

Растворимость — способность вещества в смеси с одним или несколькими другими веществами образовывать однородные системы — растворы. Растворение одного компонента в другом происходит в некоторых пределах изменения концентраций. Твердые вещества растворяются в жидкостях только до определенной концентрации, зависящей от температуры и называемой концентрацией насыщения. Жидкости также могут смешиваться между собой, но не все жидкости растворимы друг в друге и не смешиваются друг с другом неограниченно.

Растворы по концентрации растворенного вещества подразделяются на *насыщенные, ненасыщенные и пересыщенные*. В зависимости от величины частиц растворенного компонента различают *истинные растворы* и *дисперсные системы*.

Истинный раствор — однородные смеси двух или большего числа веществ (компонентов), которые равномерно распределены в растворе в виде отдельных атомов, ионов или молекул. Частицы растворенного вещества перемешиваются с молекулами *растворителя* самопроизвольно в результате диффузии. Истинные растворы всегда прозрачны и устойчивы в течение длительного времени.

Растворители — неорганические (главным образом вода) или органические (бензол, хлороформ, ацетон, спирты и др.) соединения, а также смеси (например, бензин), способные растворять различные вещества. Основные требования к растворителям — химическая инертность по отношению к растворяемому веществу, доступность и дешевизна.

Дисперсные системы — это смеси, состоящие из множества мелких частиц (дисперсная фаза, растворенное вещество) какого-либо вещества, находящихся в однородной среде другого вещества (дисперсионная среда, растворитель). Дисперсные системы характеризуются сильно развитой поверхностью раздела между частицами.

Дисперсные системы называются по-разному в зависимости от агрегатного состояния растворенного вещества и растворителя. Так, если в твер-

дом растворителе агрегатное состояние растворенного вещества твердое, жидкое или газообразное, то такие системы, соответственно, называются *золь, гель (паста) или пемза*. Для жидкого растворителя аналогичные агрегатные состояния растворенного вещества называются *суспензия, эмульсия, пена*. Для газообразного растворителя смеси с растворенным веществом в твердом или жидком состояниях называются *аэрозолями*.

По величине частиц (дисперсности) различают *грубодисперсные* и *тонкодисперсные (коллоидные) системы*.

В грубодисперсных системах размеры частиц достаточно велики (их можно видеть под микроскопом); состояние грубодисперсной системы нестабильно: происходит разделение частиц, в основном под действием силы тяжести.

Коллоидными системами называются тонкодисперсные смеси молекул растворителя (дисперсионная среда) с частицами растворенного вещества размером $10^{-6} \dots 10^{-4}$ мм.

Коллоидные системы занимают промежуточное положение между истинными растворами и дисперсными системами. Для коллоидных систем, в отличие от дисперсных, характерно интенсивное броуновское движение частиц дисперсной фазы. Коллоидные системы способны к набуханию, при этом они увеличиваются в объеме.

По физической природе все жидкости делятся на *нормальные растворы* и *жидкие кристаллы*.

Нормальные жидкости (чистые и растворы) макроскопически однородны и изотропны при отсутствии внешнего воздействия. Их свойства (теплопроводность, вязкость, самодиффузия и др.) при нагревании или уменьшении плотности, как правило, меняются в сторону сближения со свойствами газов. Вблизи же температуры кристаллизации большинство свойств нормальных жидкостей (плотность, сжимаемость, теплоемкость, электропроводность и др.) близки к таким же свойствам соответствующих твердых веществ.

Жидкие кристаллы — особое состояние жидкости с упорядоченным молекулярным строением, характеризующееся анизотропией ряда физических свойств, характерной для твердых кристаллов. Число химических соединений, для которых найдены жидкие кристаллы, составляет несколько тысяч. Жидкие кристаллы образуются также при нагревании некоторых твердых веществ до начала их плавления.

Жидкие кристаллы обладают анизотропией упругости, электропроводности, магнитной восприимчивости и диэлектрической проницаемости, оптической анизотропией, сегнетоэлектрическими свойствами и др.

Анизотропию создает *ориентационный порядок* в расположении молекул. Ориентационная упорядоченность в жидком кристалле зависит от состояния поверхности и легко изменяется под действием давления, механических нагрузок, электрических и механических полей, нагрева.

Практическое применение находят электрооптические свойства жидких кристаллов. Они применяются в буквенно-цифровых индикаторах (электронные часы, калькуляторы и др.), в различного рода управляемых экранах и оптических электронных приборах.

Газообразное состояние вещества (газ) — агрегатное состояние вещества, в котором его частицы не связаны или весьма слабо связаны силами взаимодействия и движутся свободно, равномерно заполняя в отсутствие внешних полей весь предоставленный им объем.

В газообразное состояние можно перевести любое вещество надлежащим подбором давления и температуры. Прямое превращение вещества из твердого в газообразное состояние называется *сублимацией* (возгонкой).

Плазма — частично или полностью ионизированный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов практически равны. Ионизация газа может быть вызвана температурным воздействием, электромагнитным излучением или бомбардировкой заряженными частицами. Низкотемпературная плазма ($T \sim 10^6 \dots 10^8$ К) используется в различных газоразрядных приборах (газовых лазерах, ионных приборах и т.д.), а также в технике (например, плазменных двигателях).

1.1.2. Строение однородных веществ в различных агрегатных состояниях

Строение веществ определяется характером сил взаимодействия между составляющими его структурными частицами (атомами, молекулами или ионами). Силы взаимодействия представляют собой равнодействующую сил отталкивания и притяжения, компенсирующих друг друга при нормальном равновесном расстоянии между частицами. Радиус действия этих сил не превышает 10 нм. Изменение характера и величины этих сил приводит вещество к различным агрегатным состояниям, например образованию расплава из твердого вещества или существованию кристаллического кварца и различных его полиморфных форм. В случае твердых веществ эти силы определяют объем физического тела.

1.1.2.1. Взаимодействие структурных частиц вещества

Внутреннее строение веществ определяется взаимодействием его структурных частиц. Это взаимодействие называется *связью*. Различают *химическую* и *молекулярную* связи.

Химическая связь — взаимодействие атомов (ионов), обусловленное силами, которые имеют в основном электрическую природу и возникают в результате либо переноса электрона с одного атома на другой, либо обобществления электронов парой (или группой) атомов. Равно-

весное состояние между атомами при химической связи обычно достигается на расстоянии 1,5...4 Å (1 Å = 10^{-10} м). Энергия химической связи имеет величину от 8...10 до 1000 кДж/моль.

Химические связи классифицируют по характеру распределения электронной плотности между атомами, в частности по симметрии ее распределения, и другим признакам. Основные виды химической связи: *ковалентная, ионная, металлическая и водородная.*

Ковалентная связь — вид химической связи; осуществляется парой электронов, находящихся в общем владении двух атомов, образующих связь. Эта связь может реализоваться в виде одинарной ($\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_3$), двойной ($\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$) или тройной ($\text{HC}\equiv\text{CH}$) связи. Атомы, различающиеся по электроотрицательности, образуют так называемую полярную ковалентную связь (HCl , $\text{H}_3\text{C}-\text{Cl}$).

Ковалентная связь лежит в основе существования простых газов (H_2 , Cl_2 и др.), различных соединений (H_2O , NH_3 и др.), многочисленных органических молекул (CH_4 , $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_3$ и др.), а также атомных кристаллов (различные модификации фосфора и серы, углерода и другие элементы IV, V и VI подгрупп периодической системы).

Ионная связь — вид химической связи, основанной на электростатическом взаимодействии между противоположно заряженными ионами. Такая связь характерна для соединений металлов с наиболее типичными металлоидами (например, NaCl , CaCl_2 , Al_2O_3), а также для ионных кристаллов (NaCl , CsCl и др.), в которых взаимодействие носит и частично ковалентный характер.

Металлическая связь — вид химической связи атомов в веществах, вызываемой наличием свободно движущихся валентных электронов, которые осуществляют коллективное взаимодействие атомов и удерживают их на определенных расстояниях друг от друга. Это взаимодействие характерно для чистых металлов и их соединений между собой. Валентные электроны при этом образуют общий электронный «газ». Металлическая связь, в отличие от ковалентной и ионной, является ненаправленной и нелокализованной.

Водородная связь — вид химической связи двух атомов (А и В) при участии атома водорода, т.е. $\text{A}-\text{H}\cdots\text{B}$, где В — электроотрицательные элементы: О, N, F и др. Атомы А и В могут принадлежать как одной, так и разным молекулам.

Водородная связь приводит к ассоциации одинаковых или различных молекул в комплексы (Н-комплексы). Она во многом определяет свойства воды и льда, молекулярных кристаллов, структуру и свойства многих искусственных (капрон) и природных полимеров (белки, нуклеиновые кислоты) и других соединений.

Молекулярная связь — взаимодействие нейтральных молекул (или атомов) на основе слабых электростатических сил (*вандерваальсово взаимодействие*). Вандерваальсово взаимодействие складывается из сил

притяжения (*ориентационных, индукционных и дисперсионных*) и сил отталкивания, обусловленных перекрыванием электронных оболочек атомов.

Ориентационные силы притяжения действуют между полярными молекулами, дисперсионные — между неполярными молекулами, а индукционные — между полярной и неполярной молекулами.

Молекулярная связь характерна для атомов с относительно легко деформируемыми электронными оболочками и для объединившихся в молекулы атомов, также способных к деформации внешних объединенных оболочек. Это взаимодействие определяет отклонение свойств реальных газов от идеальных, структуру и свойства молекулярных кристаллов и жидкостей и др. Молекулярная связь менее прочна, чем рассмотренная выше химическая, и вещества с такой связью имеют более низкие температуры плавления и сублимации.

В кристаллических веществах взаимодействие между структурными частицами определяет их принадлежность к одной из четырех основных групп: *ковалентным, ионным, металлическим (металлам) или молекулярным кристаллам.*

К ковалентным кристаллам относятся многие простые и сложные кристаллические вещества, например алмаз, карбид кремния, нитрид алюминия и др. Ковалентные кристаллы имеют высокие температуру плавления и твердость, малую электропроводность, большие показатели преломления.

Ионные кристаллы имеют высокую температуру плавления и испарения, высокий модуль упругости и низкие коэффициенты сжимаемости и теплового расширения, что объясняется достаточно большой величиной энергии ионной связи. Направленность связи приводит к высокой твердости и отсутствию пластичности. Ионный кристалл при испарении распадается на молекулы, а при растворении — на ионы.

Металлы по сравнению с ковалентными кристаллами имеют более низкие температуры плавления, испарения, модуль упругости, но более высокий коэффициент теплового расширения, что объясняется тем, что энергия металлической связи несколько меньше, чем ковалентной. Металлы более пластичны и менее тверды, чем ковалентные кристаллы, так как их кристаллическая решетка более плотная. Они обладают хорошей электропроводностью. Металлы непрозрачны для электромагнитных волн. Они хорошо отражают излучение, т.е. обладают блеском.

Молекулярные кристаллы имеют низкие температуры плавления и испарения, поскольку энергия связи невелика. Они — диэлектрики, так как построены из электрически нейтральных атомов (молекул), и в отличие от металлов прозрачны для электромагнитного излучения. Малая энергия связи определяет также низкий модуль упругости кристаллов и небольшие коэффициенты теплового расширения. Механические характеристики их низки.

Во многих кристаллических веществах (графит, MoS_2 и др.) между частицами сосуществуют связи различных типов (*гетеродесмическое строение*). Так, в кристаллах полупроводников (Ge, GaAs) связь в основном ковалентная, но с примесью ионной и металлической.

Для гетеродесмического строения веществ характерно наличие фрагментов, внутри которых атомы соединены более прочными (обычно ковалентными) связями. Эти фрагменты могут представлять собой отдельные области («острова»), цепи, слои, каркасы. «Островные» структуры типичны для молекулярных кристаллов; цепочечное строение имеют полимеры; слоистое строение характерно для BN, MoS_2 и многих силикатов. Для некоторых соединений характерно наличие устойчивых структурных группировок, сочетающихся в них по-разному. Так, в силикатах основной структурный элемент строения (тетраэдрическая группировка SiO_4) может выступать либо изолированным, либо образовывать пары, кольца, цепочки, слои и др.

Химическая и (или) молекулярная связи определяют взаимодействие между поверхностными слоями одинаковых тел — когезию, и взаимодействие между поверхностными слоями различных тел — адгезию.

Когезия — сцепление (притяжение) молекул (атомов, ионов) в однородном физическом теле. Когезия наблюдается у твердых и жидких тел, а при очень низких температурах или больших давлениях — и в газах.

Адгезия — сцепление (прилипание) приведенных в контакт разнородных физических тел (фаз). Адгезия возникает между твердыми, твердыми и жидкими, а также между твердыми и газообразными телами. Одна из важнейших характеристик адгезии — адгезионная прочность, характеризующая удельное усилие разрушения адгезионного контакта и используемая в технике для оценки свойств клеев, лакокрасочных покрытий и других. поверхностных изделий. Адгезия оказывает решающее влияние на механические свойства композиционных материалов. С ней связаны склеивание, нанесение покрытий, спекание и многие другие, практически важные технологические процессы.

1.1.2.2. Самоорганизация структурных частиц вещества

Общим для строения всех веществ является стремление к **самоорганизации** (порядку в расположении всех частиц), что является прямым следствием основного закона природы: **устойчивым является такое состояние системы, при котором ее энергия будет минимальна**. Образование кристаллов или молекул из изолированных атомов или многоатомных групп связано с понижением энергии системы и, следовательно, повышением ее устойчивости. Этот процесс достаточно подробно описан в термодинамике.

Изучением процессов самоорганизации структурных частиц вещества в неравновесных условиях занимается **синергетика**. Ведущий принцип синергетики: **неравновесность — источник упорядоченности**.

Рис. 2. Кристаллическое строение графита

Материаловедение изобилует множеством примеров самоорганизации строения веществ. Прекрасной иллюстрацией самоорганизации вещества является *углерод*. Он известен в виде кристаллических, аморфных и частично кристаллических переходных углеродных веществ. Это объясняется способностью углерода образовывать равнозначные валентные связи с другими атомами углерода, что позволяет строить углеродные скелеты различных типов — линейные, разветвленные, циклические.

Углерод — редкий случай, когда изменения физических и физико-химических свойств зависят только от строения, а не от состава, как это обычно наблюдается для многокомпонентных систем.

К кристаллическим формам углерода относятся *алмаз*, *графит*, *карбин*, *фуллерен* и *лонсдейлит*. Аморфными и частично кристаллическими переходными формами углерода являются *пироуглерод*, *пирографит*, *стеклоуглерод*, *сажи*, *кокс*, *волокна*, *пленки* и др.

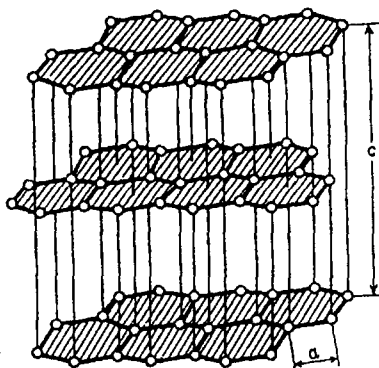
Алмаз представляет собой пространственный полимер с тетраэдрическим расположением валентных связей. Макромолекула алмаза — в высшей степени регулярный, почти идеально построенный трехмерный полимер.

Графит является «паркетным» полимером. Он имеет гексагональное строение (рис. 2). В плоскостях слоев между атомами существуют ковалентные связи, а между слоями — вандерваальсово взаимодействие, что предопределяет сильную анизотропию свойств вдоль параллельных и перпендикулярных направлений к плоскостям слоев.

Карбин — углеродный полимер с линейной структурой. В молекулу карбина входит до 2000 атомов. Длина полимерных нитей колеблется от 50 до 250 нм. Плотность карбина 1900...3200 кг/м³. Карбин химически инертен, обладает полупроводниковыми свойствами — при облучении светом его проводимость резко возрастает.

Фуллерен — гипермолекула (*кластер*) углерода C₆₀. Структура C₆₀ — полный усеченный икосаэдр, в котором имеются 20 шестиугольников и 12 пятиугольников с атомами в вершинах. Плотность 1300...1650 кг/м³. Фуллерен обладает высокой термодинамической стабильностью и уникальными свойствами: сверхпроводимостью, радиационной стойкостью, твердостью и др. Название фуллеренов получили также стабильные кластеры углерода C₆₀, C₁₂₀, C₇₆, C₈₄. Строение фуллеренов представлено на рис. 3.

Кластером в синергетике называют систему, состоящую из большого числа атомов или молекул, которые внутри этой системы сохраняют свою индивидуальность.



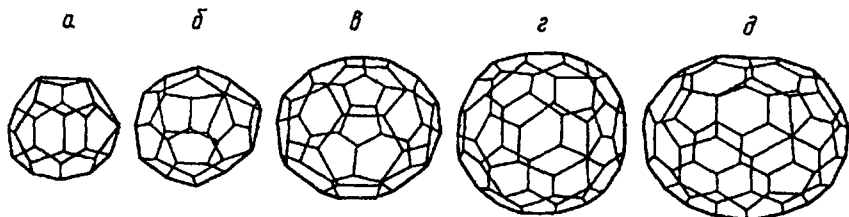


Рис. 3. Строение фуллеренов при различном числе атомов углерода:
а — 28, б — 32, в — 50, г — 60, д — 70

Лонсдейлит обнаружен в метеоритах и получен искусственно; его структура и свойства окончательно не установлены.

К основным элементам строения аморфного углерода и углерода переходных форм относятся базисные ленты, турбостратные пакеты, наборы гибридных форм и надатомные образования высшего порядка. Базисные ленты по строению аналогичны графитовым плоскостям. Турбостратные пакеты образованы параллельным соединением определенного числа графитовых плоскостей без их взаимной ориентации. Так как в каждой плоскости пакета атомы углерода расположены в строгом порядке, то каждый пакет является как бы двухмерным кристаллом.

Строение **пироуглерода** — графитовые сетки, объединенные по несколько штук в пакеты или кристаллы и расположенные параллельно поверхности осаждения. При нагреве выше 1800°C наблюдается упорядочение турбостратного строения с образованием графитового, и свыше 2400°C образуется пирографит.

Стекловидный углерод (стеклоуглерод) — сетчатый полимер углерода, имеющий надмолекулярное строение в виде клубков (глобул). При этом глобулы представляют собой беспорядочное переплетение лентовидных молекул.

Самоорганизация вещества может быть представлена как упорядочение любых его структурных элементов. Упорядоченное строение вещества реализуется на уровне как его структурных частиц (молекул, атомов и др.), так и образующих их элементов (например, электронов), а также в пространственной ориентации тех и других.

Упорядочение на расстояниях, сравнимых с межатомными, называется **ближним**, а упорядочение, распространяющееся на неограниченно больших расстояниях, — **дальним порядком**. Наличие дальнего или ближнего упорядочений в расположении атомов для одного и того же вещества (рис. 4) обусловлено силами межатомного взаимодействия.

Дальний порядок существует в кристаллических веществах, где правильное чередование частиц на одних и тех же расстояниях друг от друга повторяется для сколь угодно отдаленных частиц. Основным признаком дальнего порядка является анизотропия свойств, а структура металлических сплавов в этом случае при определенных условиях ха-

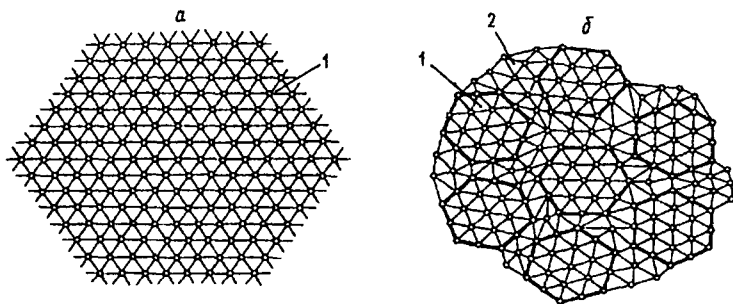


Рис. 4. Схемы размещения атомов при дальнем (а) и ближнем (б) порядке:
1 — элемент строения с упорядоченным расположением частиц вещества; 2 — беспорядочное расположение частиц

характеризуется возможностью разделения кристаллической решетки на совокупность подрешеток, каждая из которых в идеальном случае связана только с одним видом атомов.

Ближний порядок реализуется в жидких и аморфных веществах, где некоторая закономерность существует только в расположении соседних частиц. Однако ближний порядок при аморфном и кристаллическом строениях вещества принципиально различны. В аморфном веществе ближний порядок является поликластерным (например, политетраэдрическим), а для кристаллического строения характерно пространственное рассредоточение кластеров в трех измерениях.

Ближний порядок является характеристикой *топологического* (расположение атомов в пространстве независимо от их вида) и *композиционного* (распределение атомов разного вида в многокомпонентных системах) *упорядочений*. Упорядочение может проявляться как стремление атомов одного сорта окружить себя преимущественно атомами иного вида (*отрицательный ближний порядок*) или атомами того же вида (*положительный ближний порядок*).

Дальний и ближний порядки могут реализовываться в ориентации молекул (*ориентационный порядок*), магнитных моментов (*магнитное упорядочение*), дипольных электрических моментов. Упорядочение электронного газа (*вигнеровская кристаллизация* — образование периодической пространственной структуры электронного газа при низких температурах) используется при интерпретации фазовых превращений «металл — диэлектрик», в теории сильно легированных полупроводников, при описании свойств поверхности твердых тел и др.

В нормальных жидкостях однородность и изотропность объясняются отсутствием у них дальнего порядка во взаимных положениях и ориентации молекул. Положения и ориентации двух и более молекул, расположенных далеко друг от друга, оказываются статистически независимыми.

В жидких кристаллах дальний порядок наблюдается лишь в ориентации молекул, но отсутствует в расположении их центров масс. Ближний порядок в жидких кристаллах наблюдается в определенных областях — доменах, размеры которых $\sim 10^{-2} \dots 10^{-1}$ мм.

В газообразном веществе упорядочение в расположении частиц полностью отсутствует. Газ в молекулярно-кинетической теории рассматривается как совокупность слабо взаимодействующих частиц, находящихся в непрерывном хаотическом тепловом движении. Микрообъемы с правильным расположением атомов, возникнув, могут существовать некоторое время, затем рассасываться и появляться вновь в другом элементарном объеме.

1.1.3. Фазы и фазовые превращения

Рассмотрение веществ по их агрегатным состояниям не позволяет учитывать *полиморфизм*, который является частным случаем *аллотропии*.

Аллотропия — существование химических элементов в виде двух или более простых веществ. Аллотропия может быть обусловлена образованием молекул с различным числом атомов (например, кислород O_2 и озон O_3).

Полиморфизм — способность одного и того же вещества иметь различное кристаллическое строение. Каждое такое кристаллическое строение называют *полиморфной модификацией*. Полиморфная модификация вещества устойчива только в области определенных температур и давлений, вне которой она неустойчива и должна претерпевать *полиморфное превращение*. Полиморфную модификацию, устойчивую при более низкой температуре, принято обозначать буквой α , а при более высокой — β , затем γ и др.

Полиморфные превращения могут также вызываться радиоактивным облучением, механическим воздействием, в частности ударным, и др. Различие в строении полиморфных модификаций обуславливает и различие в их свойствах. Полиморфные превращения наблюдаются у неметаллов (например, у кварца) и примерно у 30 металлов.

Для однозначной характеристики вещества с учетом его возможных полиморфных модификаций необходимо описывать особенности его атомного (молекулярного) строения. Такую возможность дает использование для описания веществ более широкого понятия — *фаза*.

Фаза — термодинамически равновесное состояние вещества, характеризующееся агрегатным состоянием, атомным (молекулярным) составом и строением, а также отделенное пространственными границами от других возможных равновесных состояний (фаз) того же вещества. Термодинамически неравновесное состояние вещества называется *метастабильной фазой*.

Каждое вещество может состоять из одной или более фаз (твердых, жидких и газообразных) и однозначно характеризоваться *фазовым составом*.

Формирование реального строения и структуры веществ происходит в условиях, далеких от равновесных. Все материалы представляют собой открытые системы, т.е. такие, которые обмениваются с окружающей средой веществом, а также энергией и импульсом, что может привести к *фазовым превращениям веществ*.

Фазовое превращение — это превращение вещества из одной фазы в другую при изменении внешних условий (температуры, давления, магнитных и электрических полей и др.). Значение физической величины, при котором происходит фазовое превращение, называется *точкой фазового превращения*.

Фазовые превращения в твердом состоянии описываются как результат образования новых фаз, имеющих состав и строение, отличные от существовавших в старой фазе. В кристаллических веществах при фазовом превращении решетка новой фазы стремится так ориентироваться по отношению к решетке исходной фазы, чтобы энергия межфазной границы была минимальна, а это обеспечивается максимальным сходством в расположении атомов и соприкасающихся гранях новой и старой фазы (*принцип структурного соответствия* Данкова — Конобеевского).

Фазовые превращения рассматриваются по характеру их протекания как *превращения первого и второго родов*.

Фазовые превращения первого рода — фазовые превращения, при которых некоторые физические величины (например, плотность вещества) или термодинамические характеристики меняются скачком и при этом выделяется или поглощается теплота фазового превращения.

К фазовым превращениям первого рода относятся испарение и конденсация, плавление и затвердевание, сублимация и конденсация в твердую фазу, некоторые структурные переходы в твердых телах (например, образование мартенсита в системе «железо — углерод» и др.).

Для фазового превращения первого рода характерно существование области метастабильного состояния вблизи точки фазового превращения, например жидкость можно нагреть до температуры выше точки кипения или переохладить ниже точки замерзания.

Фазовые превращения второго рода — фазовые превращения, при которых плотность вещества, энтропия и термодинамические потенциалы не испытывают скачкообразных изменений, а теплоемкость, сжимаемость, коэффициент термического расширения фаз меняются скачком.

При фазовом превращении второго рода некоторая физическая величина, равная нулю с одной стороны от точки превращения, постепенно растет (от нуля) при удалении от точки превращения, при этом плотность изменяется непрерывно, теплота не выделяется. К фазовым превращениям второго рода относятся:

превращение парамагнетик — ферромагнетик, сопровождающееся появлением антиферромагнитного упорядочения;

превращение параэлектрик — сегнетоэлектрик с появлением спонтанной (самопроизвольной) поляризации вещества;

переход металлов и сплавов из нормального состояния в сверхпроводящее состояние;

переход гелия в сверхтекучее состояние и др.

Около точки фазового превращения второго рода состояние вещества можно характеризовать величиной, играющей роль параметра упорядочения (порядка).

Фазовый состав материала и фазовые превращения оказывают существенное влияние на все свойства и поведение материала при эксплуатации.

Изучение фаз и фазовых превращений на высоком уровне осуществляется в таких фундаментальных науках, как физическая химия и термодинамика.

Применительно к задачам материаловедения уточним некоторые важные понятия этих наук.

Термодинамика — наука о наиболее общих свойствах макроскопических физических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и о процессах перехода между этими состояниями.

Термодинамическая система — это отделенная от внешней среды реальными или воображаемыми границами и заполненная веществом часть пространства, внутри которой между составляющими систему материальными объектами возможен обмен энергией и веществом.

Термодинамическое равновесие — состояние термодинамической системы, в которое она самопроизвольно приходит через достаточно большой промежуток времени (время релаксации) в условиях изоляции от внешней среды и которое характеризуется неизменностью термодинамических параметров системы и отсутствием в ней потоков энергии и вещества. Процесс установления термодинамического равновесия (полного или частичного) в физической системе, состоящей из большого числа частиц, называется *релаксацией*.

Фазовое равновесие — состояние термодинамического равновесия многофазной системы.

Метастабильное состояние — это состояние неустойчивого равновесия физической макроскопической системы, в котором она может находиться длительное время, не переходя в более устойчивое (при данных условиях) состояние (фазу). Фактором, способствующим сохранению метастабильного состояния, может быть высокая вязкость вещества, препятствующая, например, установлению упорядоченного расположения молекул в аморфных веществах.

Гомогенная система — однородная термодинамическая система, свойства которой (состав, плотность, давление и др.) изменяются в пространстве непрерывно. Различают физически однородные и неоднородные гомогенные системы. У однородных гомогенных систем свойства в различных частях системы одинаковы, а у неоднородных гомогенных систем — различны. Однородными гомогенными могут быть газовые смеси, жидкие и

твердые растворы и другие системы. Примером физически неоднородной гомогенной системы может служить диффузионный слой при *химико-термической обработке* поверхности материала.

Гетерогенная система — макроскопически неоднородная термодинамическая система, состоящая из различных по физическим свойствам или химическому составу частей (фаз). Смежные фазы гетерогенной системы отделены друг от друга физическими поверхностями раздела, на которых скачком изменяется одно или несколько свойств системы (состав, плотность, кристаллическое строение, электрические и магнитные свойства и др.). Примером гетерогенной системы являются композиционные материалы, в которых компоненты отличны по составу, строению, свойствам. Различие между гетерогенной и гомогенной (однородной) системами не всегда четко выражено. Так, переходную область между гетерогенными механическими смесями (взвесьями) и гомогенными (молекулярными) растворами занимают коллоидные растворы, в которых частицы растворенного вещества столь малы, что к ним неприменимо понятие фазы.

Равновесный процесс — бесконечно медленный процесс, в котором термодинамическая система проходит через ряд бесконечно близких друг к другу равновесных состояний. Равновесный процесс — это *обратимый процесс*, например кристаллизация.

Необратимый процесс — физический процесс (диффузия, теплопроводность, вязкое течение жидкости и др.), который может самопроизвольно протекать только в одном направлении пространственно-временных координат.

1.1.4. Характеристика основных фазовых превращений

1.1.4.1. Фазовое превращение:

газообразное состояние — жидкое состояние

Фазовое превращение жидкого состояния в газообразное (*парообразование*) и обратно (*конденсация*) происходит при определенной для данного вещества, сильно зависящей от давления температуре $t_{\text{кип}}$.

Теплота парообразования равна теплоте конденсации.

Жидкость может переходить в газообразное состояние и при температурах ниже точки кипения. Такой процесс называется *испарением*. Теплота испарения соответствует теплоте парообразования, а ее источником обычно служит внутренняя энергия самой жидкости, которая в результате испарения охлаждается.

1.1.4.2. Фазовое превращение:

жидкое состояние — твердое состояние

Фазовые превращения кристаллических веществ. Твердое вещество образуется из его жидкого или газообразного состояния по мере понижения температуры путем сближения атомов (моле-

кул) и их группировки в кристаллик (*центр кристаллизации*). Центр кристаллизации может возникнуть только в тех микрообъемах, состав и строение которых соответствуют составу и строению вновь образующегося твердого вещества. Скорость охлаждения, количество центров кристаллизации и скорость роста вновь образующихся кристалликов определяют строение твердого вещества: кристаллическое, аморфное или стеклообразное.

Фазовое превращение из жидкого (газообразного) состояния в кристаллическое вещество называется *кристаллизацией*.

Кристаллизация — процесс образования кристаллов. При этом кристаллизация из паров, растворов и расплавов рассматривается как *первичная*, а из твердого вещества в другое кристаллическое или аморфное состояние — как *вторичная*.

Первичная кристаллизация. Фазовое превращение кристаллического вещества в жидкое (*плавление*) и обратно (*затвердевание*) происходит при определенной для данного вещества, зависящей от давления температуре $t_{пл}$. Температура плавления совпадает с температурой твердения (*температурой первичной кристаллизации*).

Плавление и твердение сопровождаются, соответственно, поглощением или выделением определенной теплоты плавления $Q_{пл}$. Теплота плавления равна теплоте твердения. Температура тела в процессе плавления или твердения не меняется, так как теплота процесса идет не на нагрев или охлаждение тела, а на разрыв или образование межатомных связей, т.е. разрушение или создание дальнего порядка.

Кристаллизация начинается при достижении некоторого предельного условия, например *переохлаждения* жидкости или пресыщения пара, когда практически мгновенно возникает множество кристалликов — центров кристаллизации.

Переохлаждение — охлаждение вещества ниже температуры его равновесного перехода в другое агрегатное состояние.

Кристаллики растут, присоединяя атомы или молекулы из жидкости или пара. Зависимость скорости роста кристалликов от условий кристаллизации приводит к разнообразию их форм роста и структуры (многогранные, пластинчатые, игольчатые, дендритные и другие формы, карандашные структуры и т.д.). В процессе кристаллизации неизбежно возникают различные дефекты.

Источником образования кристалликов часто являются всевозможные твердые частицы (примеси), играющие роль готовых центров кристаллизации. Примеси, практически не изменяя химического состава, могут вызывать уменьшение размеров зерен, так как чем больше примесей, тем больше центров кристаллизации. Использование специаль-

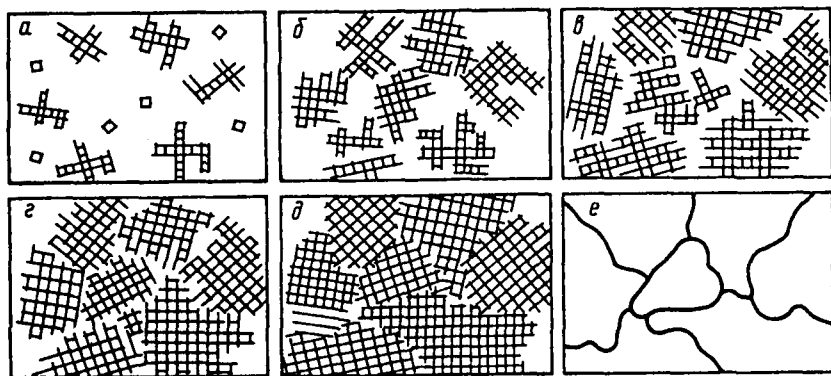


Рис. 5. Схемы процесса кристаллизации металла

но вводимых примесей (*модификаторов*) для получения мелкого зерна называется *модифицированием*.

Скорость процесса первичной кристаллизации и характер формирования структуры материала при прочих равных условиях зависят от числа центров кристаллизации, возникающих в единицу времени и в единице объема, и скорости их роста, т.е. от скорости увеличения линейных размеров растущего кристаллика в единицу времени. Чем больше скорость образования центров кристаллизации и меньше скорость их роста, тем меньше размер зерна (кристаллика), выросшего из одного центра, и, следовательно, тем более мелкозернистой будет структура материала.

Крупные совершенные монокристаллы выращивают из пересыщенных растворов и перегретых расплавов, вводя в них небольшие затравочные кристаллики, не допуская самопроизвольного зарождения.

Большинство твердых материалов являются поликристаллическими; они состоят из множества отдельных беспорядочно ориентированных мелких кристаллических зерен. Таковы, например, многие технические металлы и сплавы (рис. 5, *е*), природные строительные материалы и др. Поперечные размеры зерен — от 0,001 до 0,1 мм. Размер зерна сильно влияет на физико-химические, особенно на механические, свойства материалов (более мелкое зерно обеспечивает их большую вязкость и пластичность).

Вторичная кристаллизация. Вторичная кристаллизация как изменение кристаллического строения в твердом состоянии возможна, например, для веществ, обладающих полиморфными свойствами. Вторичную кристаллизацию называют также перекристаллизацией, так как зародыши новой структуры часто возникают на границах зерен исходных кристаллитов и растут, «поедая» их.

Рост зародышей новой фазы происходит неупорядоченным переходом атомов путем диффузии через границу раздела из исходной фазы во вновь образуемую фазу. Если строения исходной и новой фаз структурно соответствуют друг другу (имеют *когерентность*), то новая фаза располагается строго определенным образом (например, в металлах образуется *структура*, называемая *видманштеттовой*, в виде пластин или игл). Если новая фаза по составу и строению сильно отличается от исходной, то нередко она играет роль промежуточной (метастабильной) и может переходить в стабильную при определенных условиях. Переход метастабильной фазы в стабильную фазу обычно ведет к нарушению когерентности между исходной и новой фазами и образованию обычной межфазной границы.

Скорость процесса вторичной кристаллизации и характер образования структуры материала при прочих равных условиях подчиняются тем же закономерностям, что и при первичной кристаллизации.

Новая фаза в случае полиморфных превращений может образовываться путем не только диффузии, но и сдвига. Так, например, при переохлаждении высокотемпературная модификация переходит в низкотемпературную модификацию. Такое превращение называется *мартенситным*, а образующаяся новая фаза — *мартенситом*.

Мартенситное превращение — полиморфное превращение при охлаждении, при котором изменение взаимного расположения составляющих кристалл атомов (или молекул) происходит за счет их упорядоченного перемещения (сдвига), причем смещения атомов малы по сравнению с межатомными расстояниями. Мартенситное превращение в сплавах происходит без изменения концентрации фаз.

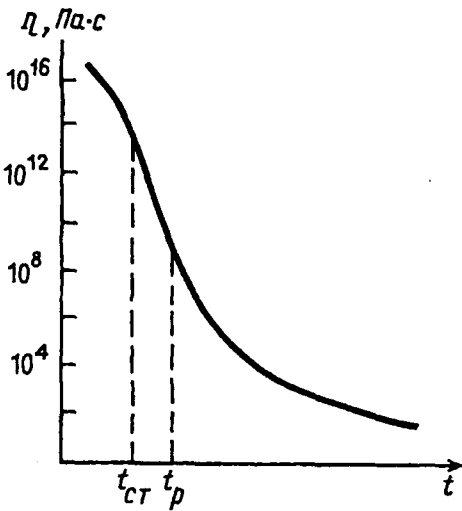
В основе мартенситного превращения лежит кооперативное и закономерное перемещение атомов, когда они сохраняют своих соседей и смещаются только по отношению друг к другу на расстояния меньше, чем межатомные. Новая фаза когерентно связана с исходной фазой, и при нарушении когерентности рост кристаллов новой фазы прекращается. В этом случае полиморфное превращение развивается за счет образования и роста новых кристаллов, когерентно связанных с исходной фазой. Рост кристаллов новой фазы протекает с очень большой скоростью ($\sim 10^3$ м/с).

С мартенситным превращением связаны такие явления, как закалка стали, «эффект памяти» и др.

Мартенсит — структурная составляющая кристаллических твердых тел, возникающая в результате мартенситного превращения.

Фазовые превращения аморфных веществ. Аморфное вещество характеризуется отсутствием точки плавления. При нагреве стекло плавится в некотором температурном интервале, который зависит от состава. На рис. 6 показана температура стеклования $t_{ст}$ ($\eta = 10^{12}$ Па · с), ниже которой стекло приобретает хрупкость, т.е. переходит в стеклообразное состояние.

Рис. 6. Зависимость вязкости стекла от температуры



Для промышленных силикатных стекол $t_{\text{ст}} = 425 \dots 600^\circ\text{C}$; температура размягчения t_p лежит в пределах $600 \dots 800^\circ\text{C}$ ($\eta = 108 \text{ Па} \cdot \text{с}$). В интервале температур между $t_{\text{ст}}$ и t_p стекла находятся в высоковязком пластическом состоянии. При температуре выше t_p ($1000 \dots 1100^\circ\text{C}$) проводятся все технологические процессы переработки стекломассы в изделия.

Фазовые превращения полимерных веществ. Полимеры могут существовать только в твердом и жидком состояниях. Они не могут быть в газообразном состоянии, так как испарению полимера обязательно предшествует его деструкция с разрывом прочных ковалентных связей. При понижении температуры чаще всего жидкие полимеры при твердении сохраняют аморфное строение переохлажденной жидкости, и так же как аморфные вещества, переходят из высоковязкого состояния в стеклообразное состояние. Отличительной особенностью полимеров при этом переходе является наличие области особого высокоэластичного состояния, обусловленного их уникальным строением (гибкостью их огромных молекул).

Расплавы некоторых полимеров при охлаждении могут кристаллизоваться, и такие полимерные кристаллы плавятся при нагреве. Для того чтобы произошел процесс кристаллизации полимера, должны выполняться определенные условия его строения, при этом области высоковязкого и высокоэластичного состояний обязательно сохраняются.

Полимерные кристаллы не имеют постоянной температуры плавления и плавятся в интервале температур. Чем меньше скорость кристаллизации, тем выше температура начала плавления.

1.2. Строение кристаллических веществ на атомной (ионной) основе

1.2.1. Кристаллическая решетка

Каждому кристаллическому веществу, находящемуся в твердом состоянии при заданных термодинамических условиях, соответствует конкретное кристаллическое строение, приводящее к определенной симметрии внешней формы и физических свойств. Кристаллическое строение ве-

ществ и материалов описывается *кристаллической решеткой*, являющейся геометрическим образом представления о кристаллическом строении.

Кристаллическая решетка — пространственное периодическое расположение атомов (ионов, молекул) в кристаллическом веществе. Точки кристаллической решетки, в которых расположены атомы или ионы, называются *узлами кристаллической решетки*. Направления, проходящие через два узла кристаллической решетки, называются *кристаллографическими направлениями*, а плоскости, проходящие через три узла, — *кристаллографическими (атомными плоскостями)*.

Изменение плотности атомов в различных плоскостях и направлениях кристаллической решетки определяет неодинаковость свойств монокристалла в зависимости от кристаллографических направлений (анизотропию).

Наиболее удобный способ единообразного описания пространственного расположения кристаллографических плоскостей и направлений заключается в приписывании им определенных индексов (*индицировании*). Кристаллографическое направление характеризуется индексами вектора, выходящего из начала принятой в кристаллической решетке системы координат, т.е. тремя целыми, взаимно простыми числами u , v и w , пропорциональными координатам любого узла кристаллической решетки, лежащего на этом направлении. Индексы направления записывают в одинарных квадратных скобках $[uvw]$ и называют *символом направления*.

Каждая кристаллографическая (атомная) плоскость в кристалле отсекает на осях координат целые числа периодов решетки, а обратные им целые числа h , k и l используются для описания положения рассматриваемой кристаллографической плоскости и называются ее *индексами* (индексами Миллера). *Символом плоскости* служат индексы кристаллографической плоскости, заключенные в круглые скобки, — (hkl) .

Для описания кристаллической решетки в целом достаточно описать ее *элементарную ячейку*.

Элементарная ячейка — параллелепипед, построенный на узлах кристаллической решетки и представляющий собой минимальный объем, отражающий все особенности кристаллического вещества, параллельные переносы (*трансляции*) которого в трех измерениях позволяют построить всю кристаллическую решетку.

Для однозначной характеристики элементарной ячейки необходимо знать ее *параметры*: величины образующих ее ребер — a , b и c (*периоды ячейки*) и три угла между ними — α , β , γ . Размеры ребер и углы между ними — основные кристаллографические константы вещества.

Полное описание кристаллической решетки дается параметрами элементарной ячейки, координатами атомов в ней и *пространственной груп-*

ной симметрии, которая содержит как операции трансляций (переносов), так и операции трансляционной симметрии (повороты, отражения, инверсии). Возможные типы трансляционной симметрии кристаллической решетки определяют 14 трехмерных геометрических решеток, так называемых *решеток Браве*, которые по признаку симметрии, в свою очередь, делятся на *сингонии*.

Сингония кристаллов — совокупность кристаллов, элементарные ячейки которых характеризуются одинаковыми кристаллографической системой осей координат и симметрией. Элементарные ячейки по признаку симметрии делятся на семь сингоний, каждая из которых характеризуется определенным соотношением между длинами ребер и углами между ними.

Решетка Браве — совокупность узлов кристаллической решетки, которые расположены в вершинах элементарных ячеек кристалла и могут быть совмещены друг с другом путем трансляций.

Различают *примитивные решетки Браве*, в которых узлы расположены только в вершинах элементарных параллелепипедов, *гранецентрированные* (узлы расположены в вершинах и в центрах всех граней), *объемно-центрированные* (узлы в вершинах и в центре параллелепипедов) и *базоцентрированные* (узлы в вершинах и в центрах двух противоположных граней).

В элементарной ячейке может размещаться от одного атома (химические элементы) до 10^2 (химические соединения) и $10^3...10^6$ атомов (например, белки). Сложное кристаллическое строение любой элементарной ячейки, в которой содержится сколько угодно атомов, можно описывать как несколько решеток Браве, «вставленных» одна в другую.

В металлах и сплавах наиболее распространены следующие кристаллические решетки: объемно-центрированная кубическая (ОЦК), гранецентрированная кубическая (ГЦК) и гексагональная плотно упакованная (ГПУ). В ячейке с ОЦК-решеткой атомы расположены в вершинах кубической элементарной ячейки и один в ее центре. Таковую решетку

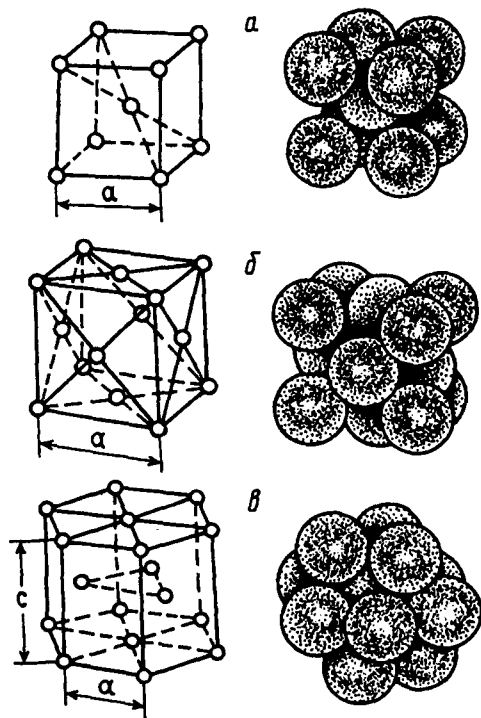


Рис. 7. Кристаллические решетки:

- а* — объемно-центрированная кубическая;
б — гранецентрированная кубическая;
в — гексагональная плотно упакованная

имеют железо до 910°C и выше 1390°C , хром, вольфрам, ванадий и др. (рис. 7, а). В ячейке ГЦК-решетки атомы расположены в вершинах кубической элементарной ячейки и по одному в центре каждой ее грани. Такую решетку имеют железо при температурах $910\ldots 1390^{\circ}\text{C}$, медь, никель, алюминий и др. (рис. 7, б). В ячейке ГПУ-решетки, имеющей форму призмы с углами в основании 60 и 120° , атомы располагаются в вершинах призмы и один в ее центре. Такая решетка имеется у магния, цинка и ряда других металлов (рис. 7, в). Периоды решетки для большинства металлов находятся в пределах $0,1\ldots 0,7$ нм.

1.2.2. Дефекты кристаллической решетки

Дефекты кристаллической решетки — это любое отклонение в ней от идеального периодического атомного (ионного) строения.

Они образуются в процессе кристаллизации, при наличии примесей, под влиянием тепловых, механических и электрических воздействий, а также под действием различного рода облучения (нейтронами, электронами, рентгеновскими лучами). Дефекты в кристаллических веществах вызывают упругие искажения кристаллической решетки, обуславливающие появление внутренних механических напряжений.

По геометрическим признакам различают следующие виды дефектов кристаллической решетки: *точечные, линейные, поверхностные и объемные.*

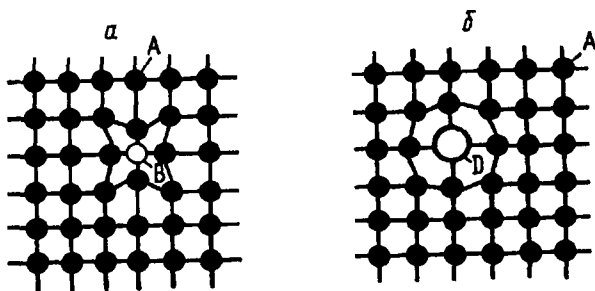
Точечные дефекты. Размеры точечных дефектов сравнимы с атомными размерами. Источниками таких дефектов могут быть:

- чужеродные атомы, замещающие основные атомы или внедряющиеся между ними (рис. 8);
- собственные атомы, сместившиеся из нормальных положений (*дислоцированные атомы*). Последние атомы очень подвижны, активно мигрируют по кристаллографическим плоскостям и могут выходить на границы зерен;
- *вакансии* — узлы кристаллической решетки, в которых отсутствуют атомы (или ионы). Вакансии чаще всего образуются в результате перехода атомов из узла решетки на поверхность или полного испарения с поверхности кристалла и реже в результате их перехода в межузлие.

Вакансии и *межузельные* (чужеродные и собственные) атомы искажают кристаллическую решетку вокруг себя на расстоянии много больше, чем расстояние между ее соседними узлами.

Вакансии находятся в термодинамическом равновесии с кристаллической решеткой, возникают и исчезают в результате теплового движения атомов. Они беспорядочно перемещаются в кристалле, обмениваясь местами с соседними атомами. Несмотря на малую концентрацию (вблизи от темпе-

Рис. 8. Точечные дефекты кристаллической решетки, вызванные чужеродными атомами (В, D), замещающими собственные (А), при соотношении радиусов $r_A > r_B$ (а) и $r_A < r_D$ (б)



ратуры плавления — от 1 до 2% числа атомов), вакансии существенно влияют на физические свойства кристалла: понижают его плотность, увеличивают электросопротивление и др. Движение вакансий является главной причиной диффузии атомов в кристаллах. Вакансии также оказывают решающее влияние на ползучесть, графитизацию и другие процессы, связанные с переносом атомов в материалах.

В ионных кристаллах точечные дефекты возникают парами: две вакансии противоположного знака — *дефект Шоттки*; межузельный ион и оставленная им вакансия — *дефект Френкеля*.

Линейные дефекты. В реальном кристалле атомы располагаются правильно лишь в пределах **блоков** — небольших участков в каждом из зерен (кристаллитов). Блоки внутри зерна повернуты относительно друг друга на небольшие углы (от нескольких долей до единиц градусов). Они обычно имеют размеры 0,1...1 мкм, что в 1—3 раза меньше размеров зерен, и состоят из 2000...10 000 атомов.

Размеры блоков и углы их разориентации определяют *блочную структуру* кристаллического вещества. На границах блоков (малоугловых границах) возникают нарушения в правильности расположения атомов, обладающие сечением порядка атомного и одним протяженным размером, т.е. образуются линейные дефекты кристаллической решетки, называемые *системой дислокаций*.

Дислокация — сгущение в расположении атомов или ионов на определенном участке кристаллографического направления, нарушающее правильное чередование атомных плоскостей.

Различают два предельных вида дислокаций: *краевые* и *винтовые*. Краевые дислокации могут быть образованы цепочкой вакансий или межузельных атомов и характеризуются появлением незавершенной добавочной атомной плоскости (*экстраплоскости*). Наиболее простой и наглядный способ образования краевой дислокации в кристалле — сдвиг (рис. 9).

Край экстраплоскости АВ представляет собой линию краевой дислокации (*дислокационную линию*), которая простирается вдоль плоскости

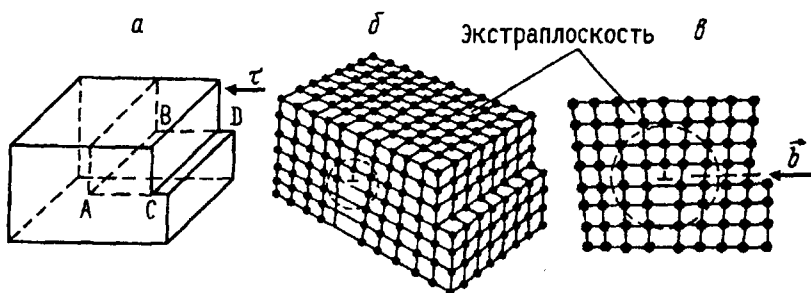


Рис. 9. Схемы расположения атомов у дислокации (а, в) и модель сдвига (б); τ — вектор сдвига, создающего краевую дислокацию

скольжения перпендикулярно к вектору сдвига τ через всю толщю кристалла. Дислокационные линии не обрываются внутри кристалла, они выходят на его поверхность, заканчиваются на других дислокациях или образуют замкнутые дислокационные петли.

При образовании краевых дислокаций наиболее существенное нарушение в периодичности и расположении атомов отмечается в поперечном сечении дефекта, но его размеры невелики и не превышают периода решетки кристалла более чем в 3—5 раз.

В случае винтовой дислокации искажение структуры обусловлено смещением атомов путем скручивания с тех мест, которые они занимают в идеальной кристаллической решетке; линия искажения является винтовой.

Основной количественной характеристикой дислокаций является *вектор Бюргерса*, описывающий величину и направление взаимного смещения областей кристалла. Вектор Бюргерса b определяют путем сравнения контура вокруг дислокации с соответствующим контуром в идеальной части решетки. При сближении двух дислокаций с одинаковыми векторами b упругие напряжения около дислокаций увеличиваются и дислокации отталкиваются. При сближении дислокаций с противоположными векторами Бюргерса их упругие поля взаимно компенсируются, дислокации притягиваются и аннигилируют.

Дислокации в кристаллических веществах легко перемещаются, так как при их перемещении в плоскости скольжения в каждый данный момент разрываются и присоединяются связи не между всеми атомами, а только между теми, которые находятся у линии дислокации. При этом экстраплоскость путем незначительного смещения может переходить в полную плоскость, а ее функции передаются соседней полной плоскости.

Дислокации в реальных кристаллах образуются в процессах кристаллизации, фазовых превращений, пластической деформации и др.

С уменьшением величины блоков и увеличением угла разориентации между ними плотность дислокаций повышается. Значительное количество дислокаций (плотность $10^6 \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$), характер их распределения в объеме кристалла, подвижность и способность к размножению оказывают существенное влияние на свойства металлов. Так, дислокации играют главную роль в процессах пластической деформации и в значительной мере определяют реальную прочность кристаллических веществ.

Поверхностные дефекты. К поверхностным дефектам причисляют границы зерен и блоков, свободные поверхности кристаллов и др. Они имеют только один малый размер — толщину. Источниками поверхностных дефектов являются:

- границы между разориентированными участками зерна (кристаллита), например дефекты упаковки, т.е. нарушения последовательности застройки атомными плоскостями отдельных участков кристалла — *двойники*;

- границы доменов (магнитных, сегнетоэлектриков);
- границы включений и др.

Многие из поверхностных дефектов представляют собой ряды и сетки дислокаций. Поверхностные дефекты, особенно границы между разориентированными участками зерна, влияют на физические свойства. Так, чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения. Вдоль границ зерен и блоков быстрее протекает диффузия, особенно при нагреве.

Объемные дефекты. Объемными дефектами кристаллической решетки являются скопления вакансий, образующих *поры* (или каналы), а также включения посторонних фаз, скопления примесей на дислокациях и др.

Дефекты кристаллической структуры веществ возникают уже в процессе их кристаллизации. Взаимодействие дефектов между собой приводит к образованию новых несовершенств. Нарушение правильности кристаллической решетки изменяет свойства материала.

Все дефекты, встречающиеся в твердых веществах, не являются независимыми. Перемещаясь, они сталкиваются друг с другом; дефекты одного типа или их совокупность при определенных условиях могут превратиться в дефекты другого типа: совокупность вакансий, например, переходит в дислокацию или пору, а пора может стать источником вакансий; совокупность дислокаций превращается в трещину; совокупность множества микроскопических пор — в одну макроскопическую пору.

Свойства веществ определяются видом и числом дефектов, например при увеличении числа объемных дислокаций растет число мест скопления примесей и снижается пластичность материала; дислокационные линии обладают повышенной диффузионной проводимостью и др.

1.3. Металлические сплавы

1.3.1. Общие сведения

Сплавы — макроскопически однородные системы, полученные из двух или более сортов атомов (молекул) металлов, неметаллов, оксидов, органических веществ и др. Химические элементы, образующие сплав, называют компонентами. В общем случае сплавы не являются механической смесью компонентов.

Классификацию сплавов проводят:

- по химическому составу;
- по числу компонентов — двойные, тройные и т.д.;
- по числу фаз — однофазные и многофазные;
- по способу получения — кристаллизацией из расплава, металлокерамическим способом, конденсацией из паров, электроосаждением из растворов, диффузионным насыщением и др.

Особенно важную роль в технике как основной вид конструкционных материалов играют *металлические сплавы*.

Металлические сплавы — макроскопически однородные системы, состоящие из двух или более сортов атомов металлов (реже неметаллов), в которых доминирующими являются атомы металла и которые обладают металлическими свойствами. Традиционно они классифицируются по химическому составу с указанием главного компонента сплава (например, медь — медные сплавы, алюминий — алюминиевые сплавы и т.п.). Внутри классов, определенных по главному компоненту сплава, распределение на группы и подгруппы чаще всего производится по характерным особенностям в свойствах или области применения данного сплава или нескольких сплавов.

Свойства металлических сплавов могут быть изменены *легированием*, а также их механической, термической, термомеханической, радиационной и другими видами обработки.

Легирование — введение в состав металлических сплавов так называемых *легирующих элементов* (например, в сталь — Cr, Ni, Mo, W, V и др.) для придания сплавам определенных физических, химических или механических свойств.

1.3.2. Характеристика фаз, образующих сплавы

Компоненты, входящие в состав сплава, могут образовывать следующие фазы:

- *жидкие растворы;*
- *твердые растворы;*
- *химические соединения.*

Металлические жидкие растворы (расплавы) представляют собой жидкое, неомогенное состояние металлов и их сплавов, которое по большинству характеристик (например, по электропроводности и теплопроводности) ближе к твердому состоянию. Качественное отличие расплава состоит в отсутствии в нем дальнего порядка в кристаллическом строении.

Большинство металлов неограниченно растворяются друг в друге. Однако некоторые металлы, например медь со свинцом, почти полностью нерастворимы в жидком состоянии и разделяются по плотности, образуя два жидких несмешивающихся слоя.

Твердые растворы — однородные твердые вещества, состоящие из нескольких компонентов, концентрации которых могут быть изменены без нарушения однородности. Твердые растворы бывают кристаллическими (металлические сплавы, полевые шпаты) и аморфными (большинство стекол).

Металлическими твердыми растворами называют сплавы, однофазные в твердом состоянии, в которых соотношение компонентов может быть переменным и один из компонентов (растворитель) сохраняет свою кристаллическую решетку, а атомы другого (или других) компонента располагаются в решетке этого компонента, изменяя ее размеры (периоды решетки).

Металлические твердые растворы образуются в результате проникновения в кристаллическую решетку основного металла атомов другого металла или неметалла. Различают *твердые растворы замещения* и *твердые растворы внедрения* (рис. 10). Вероятность образования твердых растворов замещения или внедрения определяется размерами атомов основного металла и примеси. Так, растворы внедрения чаще всего образуют углерод, водород, азот, бор и др., концентрация которых может составлять 1...2%. При образовании твердых растворов замещения размеры атомов основного металла и примеси должны отличаться не более чем на 15% (хорошо замещаются атомы Fe и Cr, Cu и Ni, Ti и V и др.).

Так как электронное строение и размеры атомов основного металла (растворителя) и растворенного компонента различны, то при образовании металлического твердого раствора кристаллическая решетка всегда искажается и периоды ее изменяются. При образовании раствора внедре-

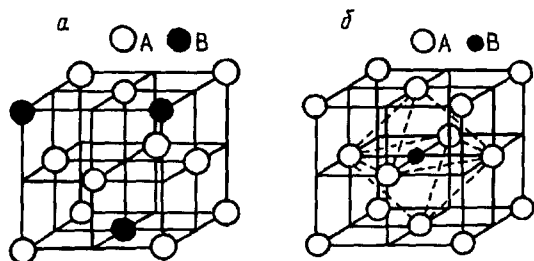


Рис. 10. Кристаллическая решетка твердых растворов замещения (а) и внедрения (б)

ния период решетки растворителя всегда возрастает, а при образовании твердого раствора замещения — может увеличиться или уменьшиться в зависимости от соотношения атомных радиусов растворителя и растворенного компонента.

Большинство металлов в той или иной степени взаимно растворяются друг в друге в твердом состоянии. Например, без изменения типа кристаллической решетки в алюминии может растворяться до 5,5% Cu, а в меди — 39% Zn. Если компоненты могут замещать друг друга в любых количественных соотношениях, то они образуют непрерывный ряд твердых растворов, имеющих одну и ту же кристаллическую решетку.

Образование твердых растворов всегда сопровождается увеличением электрического сопротивления и уменьшением его температурного коэффициента. Твердые растворы обычно менее пластичны (исключение составляют твердые растворы на основе меди) и всегда более твердые и прочные, чем чистые металлы. При этом более значительно свойства изменяются в твердых растворах внедрения, так как искажения решетки при их образовании больше.

В некоторых сплавах (например, Cu—Au, Fe—Al, Fe—Si и др.), образующих твердые растворы замещения, может протекать процесс упорядочения в расположении атомов растворенного компонента с сохранением строения решетки растворителя. При повышении температуры степень упорядочения постепенно уменьшается, а выше определенной температуры (*точка Курнакова*) твердый раствор становится полностью неупорядоченным.

Полностью упорядоченные твердые растворы (*сверхструктуры*) образуются при температурах ниже точки Курнакова, когда отношение компонентов в сплаве равно целому числу: 1 : 1; 1 : 2; 1 : 3 и др. В этом случае сплаву с упорядоченным строением можно приписать формулу химического соединения, например CuAu или Cu₃Au (рис. 11). Таким образом, упорядоченные твердые растворы можно рассматривать как промежуточные фазы между твердыми растворами и химическими соединениями.

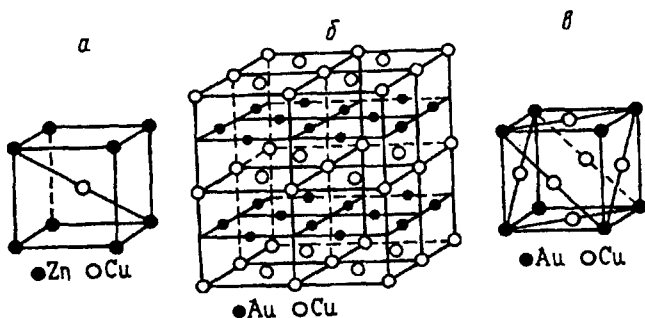


Рис. 11. Кристаллические решетки упорядоченных твердых растворов:
а — CuZn; б — CuAu; в — Cu₃Au

Образование сверхструктур сопровождается изменением физических (механических, электрических, магнитных и др.) свойств. Так, обычно возрастают прочность, твердость, электропроводность, коэффициент электрического сопротивления, а пластичность ухудшается.

В металловедении принято обозначать чистые компоненты большими буквами латинского алфавита — А, В, С и т.д.; твердые растворы — малыми буквами греческого алфавита — α , β , γ и т.д., а упорядоченные твердые растворы теми же буквами со штрихом — α' , β' , γ' и др. Твердые растворы составляют основу большинства промышленных конструкционных сплавов и сплавов специального назначения.

Понятие «**химическое соединение**» определяет химически индивидуальное вещество, в котором атомы одного (например, N₂ и O₂) или различных (CuZn, Mo₂C) элементов соединены между собой тем или иным видом химической связи. Известно свыше 3 млн химических соединений.

В металлических сплавах это понятие охватывает только химические соединения, образованные из различных компонентов сплава.

Химическое соединение в металлических сплавах — это промежуточная фаза из компонентов сплава, имеющая *сингулярную точку*.

Сингулярная точка — максимум на кривой «состав — свойство», в которой первая производная свойства по составу претерпевает разрыв.

Химические соединения в металлических сплавах имеют ряд характерных особенностей:

- в соединении всегда сохраняется простое кратное соотношение компонентов по формуле A_nB_m , где А и В — соответствующие элементы, а n и m — взаимно простые числа;
- кристаллическая решетка химического соединения отличается от решеток компонентов, образующих это соединение;

- свойства соединения резко отличаются от свойств образующих его компонентов;
- температура плавления (диссоциации) постоянна;
- образование химического соединения всегда сопровождается значительным тепловым эффектом.

Химические соединения, образующиеся в металлических сплавах из различных компонентов сплава, отличаются от типичных химических соединений тем, что не подчиняются законам валентности и не имеют постоянного состава, а от упорядоченных твердых растворов тем, что сохраняют свою кристаллическую решетку до температуры плавления.

Химические соединения по электронному строению и свойствам разделяют на классы: *электронные соединения*, *интерметаллиды*, *фазы внедрения* и др.

Электронные соединения (электронные фазы) чаще всего образуются между одновалентными (Cu, Ag, Li, Na и др.) металлами или металлами переходных групп (Fe, Mn, Co и др.) и простыми металлами с валентностью от 2 до 5 (Be, Mg, Zn, Al и др.). Эти соединения образуют с компонентами, из которых они состоят, твердые растворы в широком интервале концентраций.

Электронные соединения отличаются определенным отношением числа валентных электронов к числу атомов, т.е. имеют конкретную электронную концентрацию, каждой из которых соответствует свой тип кристаллической решетки. Так, например, все химические соединения с электронной концентрацией, равной $\frac{3}{2}$ (1,5), имеют кубическую объемно-центрированную, сложную кубическую или гексагональную решетки и обозначаются как β -соединения (CuBe, CuZn, Cu₃Al, Cu₅Sn, CoAl, FeAl и др.). Химические соединения с электронной концентрацией $\frac{21}{13}$ (1,62) имеют сложную решетку и обозначаются γ -фазой (Cu₅Zn₈, CuCd₃, Au₃Sn и др.), с концентрацией $\frac{7}{4}$ (1,75) — плотно упакованную гексагональную решетку и обозначаются ϵ -фазой (CuZn₃, Cu₃Si, Au₃Sn и др.). Свойства электронных соединений в значительной степени зависят от упорядоченности в расположении атомов компонентов.

Интерметаллиды (интерметаллические соединения) — химические соединения металлов с металлами и неметаллами (нитриды, карбиды, гидриды и др.), обладающие металлической связью. Интерметаллические соединения образуют переходные металлы (Fe, Mn, Cr, Mo и др.) с углеродом, азотом, бором и водородом, с элементами, имеющими малый атомный радиус.

Фазы внедрения имеют химические формулы: M₄X (Fe₄N, Mn₄N и др.), M₂X (W₂C, Mo₂C, Fe₂N и др.), MX (WC, VC, TiC, VN и др.) и MX₄ (ZrH₄). Это соединения типа карбидов, нитридов, боридов и гидридов.

Фазы внедрения являются фазами переменного состава, т.е. часть узлов решетки, которые должны быть заняты атомами одного из компонентов, могут оказаться свободными, а в избытке по сравнению со стехиометрическим соотношением M_nX_m имеется другой компонент. На базе фаз внедрения

легко образуются *твердые растворы вычитания*, называемые иногда твердыми растворами с дефектной решеткой. Растворы вычитания образуются, например, в карбидах VC, TiC, ZrC, NbC и др.

Кристаллическое строение фаз внедрения определяется соотношением атомных радиусов неметалла (R_x) и металла (R_m). Атомы металла расположены по типу одной из простых решеток (кубической или гексагональной), в определенные пустоты (поры) которой внедрены атомы неметалла. При $R_x/R_m \geq 0,59$ (например, в карбидах железа, марганца, хрома) образуются соединения с более сложной решеткой, которые нельзя считать фазами внедрения.

В фазах внедрения преобладает металлическая связь, что определяет такие свойства, как высокая электропроводность, положительный коэффициент электросопротивления и др. Некоторые фазы внедрения обладают сверхпроводимостью. Фазы внедрения чрезвычайно тугоплавки и имеют твердость, близкую к твердости алмаза (например, карбиды и нитриды), что объясняется наличием в этих фазах значительной доли ковалентной связи.

Карбиды и нитриды, относящиеся к фазам внедрения, во многом определяют свойства коррозионно-стойких, износостойких и жаропрочных конструкционных сталей. Карбиды тугоплавких металлов служат основой порошковых твердых сплавов для режущих инструментов.

1.3.3. Структура сплавов

Металлы и сплавы при одном и том же химическом составе могут иметь различную структуру в зависимости от способов получения, применяемых методов и режимов термической и механической обработок и др. Различают *макро-*, *микро-* и *субструктуры металлов*. Методы контроля структуры металлов и сплавов стандартизированы (ГОСТ 3443—77, ГОСТ 5639—65, ГОСТ 5640—68, ГОСТ 8233—56, ГОСТ 21073.0—75, ..., 21073.4—75).

Макроструктура — структура материала, видимая невооруженным глазом или при небольшом увеличении (30—40 раз), например с помощью лупы. Дефекты макроструктуры (химическая и структурная неоднородность) связаны с составом материала, а также со способом его получения и видами последующего воздействия на свойства. Так, для твердых веществ наиболее распространенными дефектами являются *поры* (объемная количественная характеристика — *пористость*) и *трещиноватость*.

Поры — мелкие ячейки в материале, заполненные воздухом или жидкой фазой. Поры бывают открытые и закрытые, мелкие и крупные и т.д. Открытые поры сообщаются с окружающей средой и могут сообщаться между собой.

Пористость — относительный объем пор в материале. От пористости материалов зависят средняя плотность, водопоглощение, прочность, теплопроводность, морозостойкость и другие свойства.

Трещиноватость — явление разделения вещества или материала трещинами различной протяженности, формы и пространственной ориентации.

Для разрыхленных агрегатов характерным элементом макроструктуры являются *пустоты* (объемная количественная характеристика — *пустотность*).

Пустоты — это заполненное воздухом пространство между частицами разрыхленного или дисперсного материала.

Пустотность — отношение суммарного объема пустот в разрыхленном материале ко всему объему, занимаемому этим материалом.

Для литых материалов характерны такие дефекты макроструктуры, как пригар, усадочные пустоты, газовые раковины (пузыри), ужимины, трещины, пустоты; для деформированных материалов — расслоение, волосовины, флокены, надрывы, окалина; для термически обработанных материалов — закалочные трещины и т.д., а в сварных изделиях — непровар и пр.

Макроскопический анализ (макроанализ) заключается в определении структурных и химических особенностей макроструктуры, а также дефектов материала путем изучения макроструктуры.

Макроструктуру металлов оценивают на отшлифованных и протравленных образцах путем сравнения с эталоном по шести показателям: центральной пористости, ликвации, подкорковым (вблизи поверхности) пузырям; монокристаллическим трещинам; послойной кристаллизации и светлой (*пониженной травленности*) полоске.

Метод визуального (или при небольших увеличениях) наблюдения изломов называют **фрактографией**. На изломах макроструктуру оценивают путем сравнения с нормативными макроструктурами, приведенными в ГОСТ 10243—75, по 25 параметрам. Определение вида, формы и цвета излома позволяет характеризовать многие особенности строения и обработки материала.

Изучение макроструктуры позволяет дать общую оценку состояния поверхности путем анализа типичных или наиболее важных ее участков (или их макрошлифов), а также по изломам выявить дефекты, которые способствовали разрушению материала.

Макроанализ часто является лишь предварительным видом исследования для выявления участков поверхности материала, которые должны быть подвергнуты более подробному микроскопическому исследованию.

Микроструктура — структура материала, наблюдаемая с помощью оптического или электронного микроскопа. Она может быть *однофазной* и *многофазной*.

Среди основных характеристик микроструктур определяющими являются:

- для однофазных — размеры, форма и ориентация кристаллитов (зерен);

- для многофазных — характеристики зерен каждой фазы, перечисленные выше, а также относительное количество каждой фазы и их взаимное расположение.

Оптическая микроскопия позволяет наблюдать микроструктуру материала при общем увеличении до 2000—3000 раз, что дает возможность обнаружить элементы микроструктуры размером 0,2 мкм и более.

Оптическую микроскопию применяют для изучения микроструктуры на образцах материалов (микрошлифах) после их специальной химической, электрохимической или физической обработки. Изучаемые элементы микроструктуры — включения, размеры и форма зерен, их внутренние и внешние границы, объемные и поверхностные дефекты кристаллической решетки.

Применяемый метод изготовления микрошлифов имеет решающее значение для эффективного и правильного микроскопического анализа. Изготовление образцов в целом включает следующие этапы: вырезка образцов, шлифовка и полировка, специальные методы подготовки исследуемой поверхности образцов.

Специальные методы подготовки исследуемой поверхности образца применяются для выявления его структурных составляющих. К таким методам относят выявление структуры травлением в растворах, при нагреве до высоких температур, методом ионной бомбардировки и др.

Характер изучаемой микроструктуры при измерении, подсчете, введении определенной классификации можно оценивать количественно. Подобные методы, опирающиеся во все более значительной степени на использование электронно-счетных приборов, лежат в основе *количественной микроскопии*.

Субструктура (тонкая структура) — внутризеренная структура кристаллических веществ, наблюдаемая при очень больших увеличениях. Так, каждое зерно реального металла состоит из *субзерен (микродефектов)*, основными характеристиками которых являются *средние размеры и углы взаимной разориентировки*. Субзерна разделены мало- или среднеугловыми *субграницами*.

По происхождению субзерна металла рассматривают как *фрагменты, блоки, полигоны и области когерентного рассеяния*.

Фрагменты возникают при развитой пластической деформации металла в холодном состоянии; блоки — при кристаллизации и при деформации; полигоны — как результат перестройки дислокаций при нагреве после холодной пластической деформации или во время пластической деформации в определенном интервале повышенных температур. Области когерентного рассеяния введены для объяснения пониженной интенсивности рентгеновских интерференций.

В реальных металлах можно обнаружить перечисленные варианты субзерен в различных сочетаниях (табл. 1).

Таблица 1

*Размеры и ориентационная классификация
элементов структуры реального металла*

Наименование элемента субструктуры	Характеристика элементов субструктуры	
	средний размер, см	угол взаимной разориентировки
Зерно	$1 \cdot 10^{-1} \dots 1 \cdot 10^{-2}$	$0 \dots 180^\circ$
Субзерно	$1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-4}$	$1 \dots 5^\circ$
Фрагмент, блок, полигон	$1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-5}$	$20 \dots 60'$
Область когерентного рассеяния	$1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-7}$	$10 \dots 60''$

В электронных микроскопах изображение микроскопических и субмикроскопических объектов получают на основе использования волновой природы быстро движущихся электронов, что обеспечивает высокую разрешающую способность (до 0,3 нм). Основную роль в получении изображения в электронном микроскопе играют явления рассеяния и дифракции.

Электронная микроскопия широко применяется для исследований микро- и субструктуры кристаллических образцов. С ее помощью могут быть, например, выявлены дефекты упаковки, границы зерен, двойники, границы доменов и дислокации.

Растровая электронная микроскопия (микрорентгеноспектральный анализ) применяется для прямого микроскопического исследования поверхности образца. Особенно целесообразно применение этого метода для изучения изображений изломов или коррозии поверхностей.

Принцип работы растрового электронного микроскопа заключается в том, что, изменяя длину волны электронов, можно вызвать и зафиксировать или характеристическое рентгеновское излучение микрообъемов поверхности объекта, или поток вторичных электронов. Изображение в растровом микроскопе дается на экране катодно-лучевой трубки и синхронизировано со сканированием поверхности образца электронным лучом. Таким образом, на экране можно получать изображения сканируемого участка поверхности в рентгеновских лучах, поглощенных или отраженных электронах, а также получать, используя эталоны элементов, их концентрационную кривую вдоль линии сканирования.

Наименьшее увеличение составляет ~15, наибольшее полезное — около 50 000. В случае массивных объектов получают изображение в отраженных электронах, которые выходят из слоя толщиной до 10 мкм и позволяют получать информацию как о топографии поверхности, так и о содержании элементов с различными порядковыми номерами.

Субструктура кристаллических веществ определяет многие механические и физические свойства кристаллических веществ и материалов, кинетику фазовых превращений, склонность к коррозии и др.

1.3.4. Фазовые и структурные превращения в сплавах

Характер фазовых и структурных превращений в сплавах при изменении температуры можно проследить с помощью анализа микроструктуры, так как между микроструктурой сплавов и их свойствами существует четкая связь.

В процессе кристаллизации кристаллиты, выделяющиеся из жидкого раствора, имеют переменный состав, зависящий от температуры. Возникает неоднородность химического состава — *ликвация*. При этом неоднородность химического состава сплава внутри отдельных зерен называют внутрикристаллитной (или дендритной) ликвацией.

При охлаждении с бесконечно малыми скоростями (например, при охлаждении вместе с выключенной печью, в которой осуществлялся нагрев) в сплавах достигают равновесного состояния, поскольку при этих условиях процессы диффузии в жидкой и твердой фазах успевают за процессом кристаллизации и состав кристаллитов выравнивается. Тогда при любой произвольно выбранной температуре сосуществующих фаз содержание в них компонентов будет вполне определенным, а каждая фаза сплава — гомогенна.

В твердом состоянии в подавляющем большинстве случаев металлы и металлические сплавы представляют собой поликристаллическое вещество, состоящее из большого числа мелких ($10^{-1} \dots 10^{-5}$ см), различно ориентированных по отношению друг к другу кристаллитов (зерен), размеры, форма и взаимное расположение которых формируются при охлаждении в процессе кристаллизации. Каждый кристаллит чаще всего не имеет правильной огранки. Микроструктура такого поликристаллического вещества может быть одно- или многофазной.

Однофазная микроструктура формируется в сплавах при полной взаимной растворимости компонентов или в случае, когда количество растворимого компонента не превышает его предельной растворимости. Микроструктура таких сплавов представляет собой зерна твердого раствора. Форма зерен (рис. 12) может быть:

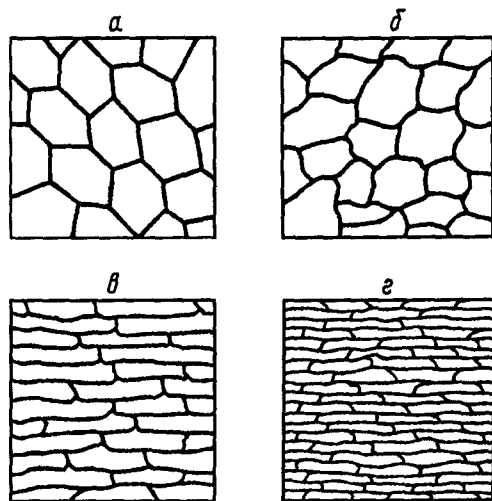


Рис. 12. Схемы микроструктур однофазных металлов и сплавов.

Форма зерен: а — полиэдрическая; б — равноосная; в — вытянутая зернистая; г — пластинчатая

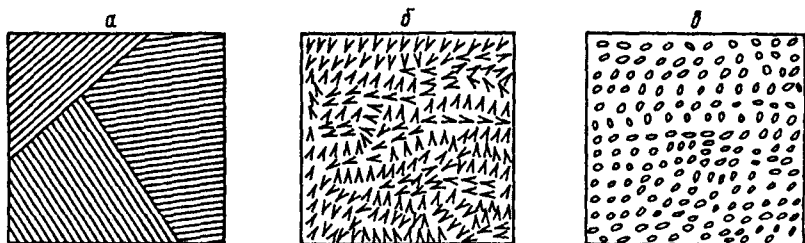


Рис. 13. Форма выделения избыточных фаз в двухфазных смесях:
а — пластинчатая; б — игольчатая; в — сферическая

- *полиэдрической* — кристалл формируется в виде правильного многогранника (полиэдра) с относительно плоскими гранями;
- *равноосной* — примерно одинаковые линейные размеры во всех направлениях;
- *вытянутой* (или *столбчатой*) — один из линейных размеров значительно превосходит остальные;
- *пластинчатой* — имеются пластины с определенной ориентацией.

Зерна сплавов приобретают полиэдрическую форму, например, после кристаллизации с малой степенью переохлаждения, горячего деформирования или рекристаллизационного отжига. Полиэдрическая форма зерен типична для всех чистых металлов. Равноосные зерна образуются при кристаллизации со значительной степенью переохлаждения, вытянутые — при холодной пластической деформации, при кристаллизации с направленным теплоотводом. Пластинчатая форма зерен образуется в металлах и сплавах с полиморфным превращением при определенных условиях охлаждения и, как правило, обеспечивает небольшое повышение прочности металла.

Двух- и многофазная микроструктуры характерны для многих сплавов с ограниченной растворимостью компонентов. Если в сплаве растворимый компонент присутствует в количестве, превышающем его предельную растворимость в основном металле при данной температуре, то образуется структура, состоящая из матрицы (основного твердого раствора) и выделившихся частиц другого твердого раствора. Такую структуру называют *матричной* (или *гетерогенной*). Матричная структура наиболее типична для сплавов, состоящих из основного твердого раствора на базе металла-растворителя (Al, Mg, Fe) и частиц одного или нескольких химических соединений (Fe_3C , CuAl_2 , Al_3Mg_2 и др.).

Возможны случаи одновременной кристаллизации из жидкости двух или более фаз (рис. 13). Если в этом случае имеет место контакт образовавшихся фаз с фронтом жидкого расплава, то образуется смесь с характерной пластинчатой формой кристаллов. Если одна из фаз растет

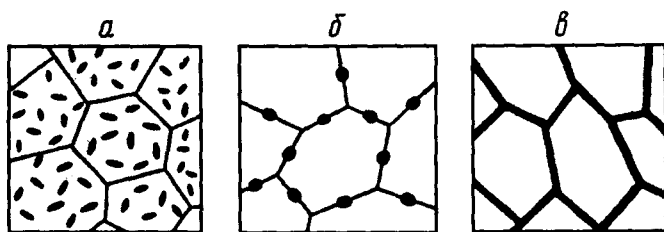


Рис. 14. Схемы микроструктур двухфазных сплавов с выделениями вторичной фазы: *а* — внутризеренные выделения, *б* — выделения по границам зерен; *в* — сетка по границам зерен

быстро, а другая изолируется от основного жидкого раствора, то смесь состоит из матричного кристалла, внутри которого распределены включения другой фазы. Кристаллы этой фазы имеют *игольчатую* или *сферическую форму*.

В твердом состоянии могут происходить главным образом два типа превращений, которые формируют структуру сплава. Во-первых, твердый раствор может претерпевать перекристаллизацию по типу кристаллизации из жидкого состояния, например при наличии дефектов кристаллической решетки (включения, блочная структура и др.) — внутри матричных зерен (рис. 14, *а*). Во-вторых, формирование структуры может происходить из-за уменьшения растворимости при понижении температуры. Так, в двухфазных сплавах избыточная (вторичная) фаза может выделяться из твердого раствора: при медленном охлаждении — по границам зерен твердого раствора (матрицы) в виде достаточно крупных и нередко равноосных частиц (рис. 14, *б*); при ускоренном охлаждении — по границам вокруг матричных зерен в виде оболочки (*сетки*) из выделяющейся фазы (рис. 14, *в*).

Формы выделений и свойства избыточной фазы в значительной степени влияют на свойства всего сплава. Если, например, избыточная фаза является твердой и хрупкой, то выделение ее в виде сетки значительно ухудшает пластичность и вязкость всего сплава; равномерное распределение избыточной фазы в виде мелких включений зернистой формы в основной фазе повышает прочность сплава, не вызывая резкого снижения пластичности.

При металлографическом описании микроструктур сплавов используют понятие *структурная составляющая*, под которым понимается часть сплава (однофазная или многофазная), имеющая характерную (однообразную) структуру и отделенная от остальных частей сплава поверхностями раздела. Так, самостоятельной структурной составляющей (элементом микроструктуры сплавов) может быть *механическая смесь* из двух или более фаз (например, твердых растворов, твердого раствора

и химического соединения), чередующихся между собой и имеющих границы раздела внутри обобществленного зерна. В механической смеси каждый из компонентов сохраняет свои специфические свойства.

Такие механические смеси образуются путем срастания кристаллитов между собой при кристаллизации и, соответственно, называются:

- **эвтектика** или **перитектика** — при образовании в отдельной первичной кристаллизации;
- **эвтектоид** или **перитектоид** — при образовании во вторичной кристаллизации.

Эвтектика, эвтектоид, перитектика и перитектоид возникают при соответствующих фазовых превращениях.

Эвтектическим превращением в сплавах называется такое, при котором происходит одновременная кристаллизация двух фаз при постоянной и самой низкой для данной системы сплавов температуре первичной кристаллизации, а *эвтектоидное превращение* соответствует аналогичному процессу при вторичной кристаллизации.

Эвтектика представляет собой равномерно чередующиеся пластинки структурных компонентов, образованных из двух или более фаз. Иногда фазы в эвтектике непрерывно разветвлены друг в друге. В эвтектике могут присутствовать также обособленные кристаллы твердых растворов или химических соединений.

Структуры эвтектики и эвтектоида схожи, но эвтектоиды являются более дисперсными структурными составляющими, так как образуются при распаде твердого раствора в процессе вторичной кристаллизации, когда процессы диффузии протекают более медленно.

При *перитектическом превращении* в сплавах, в отличие от эвтектического, кристаллизуются одновременно не две фазы, а только одна, образующаяся за счет ранее выделившейся твердой фазы и жидкой части сплава определенного состава. Выявление структуры перитектики затруднено, как правило, тем, что перитектическое превращение в условиях охлаждения сплавов технических металлов обычно не протекает до конца.

Фазовые и структурные превращения, рассмотренные выше, протекали за счет диффузии при очень медленном охлаждении и заканчивались образованием стабильных фаз. При больших скоростях охлаждения можно подавить диффузионный процесс (например, распад твердого раствора при температурном изменении растворимости компонентов). В этом случае после охлаждения при низкой температуре сплав будет состоять из метастабильной при этой температуре фазы.

Образование метастабильной высокотемпературной фазы при переохлаждении чаще всего происходит, как мартенситное превращение,

путем сдвига, т.е. осуществляется кооперативное (с сохранением своих соседей) перемещение атомов на расстояния меньшие, чем межатомные, при когерентности кристаллических решеток новой и исходной фаз. При этом кристаллы мартенсита имеют форму пластин, как правило, закономерно ориентированных относительно исходной высокотемпературной фазы.

1.3.5. Диаграммы состояния сплавов

Сплавы в подавляющем числе случаев находятся в метастабильном состоянии, т.е. в таком состоянии, когда они обладают ограниченной устойчивостью. Истинное равновесие в практических условиях достигается редко. Состояние сплава зависит от внешних условий (например, от температуры, давления) и характеризуется числом и концентрацией образовавшихся фаз. Для описания фазового состава сплавов в условиях, достаточно близких к равновесному состоянию, используют *диаграмму состояния*.

Диаграмма состояния (фазового равновесия) сплава — графическое изображение соотношения между параметрами состояния (температурой, давлением, составом) термодинамически равновесной системы, т.е. фазового состояния любого сплава изучаемой системы компонентов в зависимости от его концентрации (в процентах по массе или, реже, в атомных процентах) и температуры. Обычно применяют проекции диаграммы состояния на одну из координатных плоскостей при постоянном значении остальных параметров, например на плоскость температура — состав при постоянном давлении.

Диаграмма состояния характеризует окончательное или предельное состояние сплавов, т.е. полученное после того, как все превращения в них произошли и полностью закончились.

Диаграммы состояния сплавов получают на основании данных экспериментальных исследований термического, микроскопического, рентгеноструктурного, магнитного и других анализов. Основным, наиболее простым и широко используемым является метод термического анализа. При термическом анализе определяют температуру начала и конца затвердевания сплавов в случае перехода их из жидкого состояния в твердое, а также температуры всех фазовых превращений, происходящих в сплавах в твердом состоянии (например, полиморфизм). Полученные на кривых охлаждения характерные (*критические*) точки, фиксирующие начало и конец горизонтальных (изотермических) участков или перегибов, переносят в координаты «температура — состав сплава» (рис. 15).

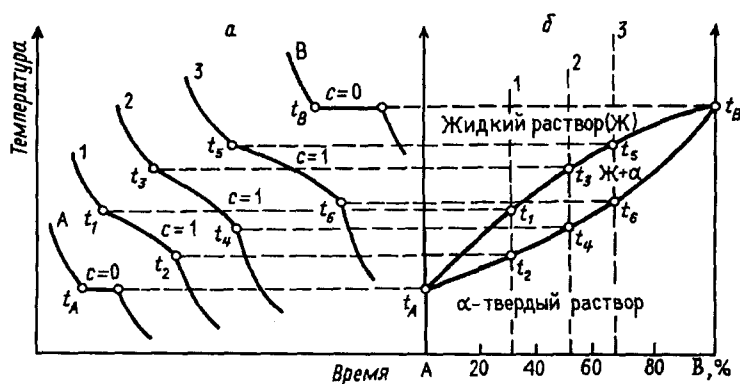


Рис. 15. Построение диаграммы состояния для случая неограниченной растворимости компонентов А и В в твердом и жидком состояниях:

а — кривые охлаждения; б — диаграмма состояния

Фазовый анализ кривых охлаждения проводят, используя **правило фаз Гиббса** (закон фаз): число равновеснo сосуществующих в какой-либо системе фаз не может быть больше числа образующих эти фазы компонентов плюс, как правило, 2.

Это правило связывает число существующих фаз Φ , число компонентов сплава K и число степеней свободы C в одно уравнение:

$$C = K - \Phi + 2. \quad (1)$$

Степенями свободы (вариантностью) системы называются такие независимые параметры (температура, давление, концентрация), при изменении которых число фаз, находящихся в равновесии, не меняется. Цифра 2 в уравнении (1) отражает допущение, что фазовое состояние системы определяется двумя параметрами — температурой и давлением. Для металлических систем, рассматриваемых при постоянном давлении, равном атмосферному, закон фаз записывается как $C = K - \Phi + 1$.

Правило фаз Гиббса позволяет определить, какие параметры системы (например, температура и состав) можно изменить без изменения числа фаз, т.е. безвариантно (нонвариантно) или с изменением (моно- и бивариантно).

При нонвариантном равновесии сплав из данного числа фаз может существовать только при постоянной температуре и определенном составе всех находящихся в равновесии фаз. Это означает, что превращение начинается и заканчивается при одной постоянной температуре. Так, например, эвтектические и перитектические превращения, протекающие при участии трех фаз постоянного состава, соответствуют нонвариантному равновесию и протекают при постоянной температуре.

Диаграммы состояния одно- или двухкомпонентных систем — это плоскостное изображение, на котором конкретные состояния системы характеризуются такими геометрическими образами, как точки и линии.

Диаграммы многокомпонентных систем представляют собой сложный объемный геометрический образ. Так, диаграмма состояния тройных сплавов имеет вид трехгранной призмы, основанием которой служит равносторонний треугольник, на сторонах которого указывают концентрацию компонентов. Компоненты, образующие сплав, указывают в вершинах треугольника, двойные сплавы — на сторонах треугольника, а тройные — точками внутри треугольника. Превращения в тройных сплавах удобнее наблюдать не по пространственной диаграмме состояния, а по ее сечениям (разрезам).

На диаграмме состояния двухкомпонентных систем на оси абсцисс точками указываются составы сплавов, а на двух осях ординат (каждая соответствует 100%-ному содержанию одного из компонентов) — их температура. Любая точка на диаграмме определяет фазовый и химический составы сплава, а также его структуру при данной температуре. Вертикальная линия соответствует определенному химическому составу.

Линии, соединяющие критические точки аналогичных превращений в системе, разграничивают области существования равновесных фаз. Например, линия *ликвидус* и линия *солидус* — геометрические места, соответственно, точек начала и окончания затвердевания двойных сплавов с различным содержанием компонентов.

Вид диаграммы состояния двойной системы определяется взаимодействием ее компонентов в жидком и твердом состояниях (образовании жидких и твердых растворов, химических соединений и промежуточных фаз), а также наличием полиморфных превращений компонентов. Диаграммы состояний многих двойных (бинарных) сплавов имеют сложный вид, так как в сплавах могут происходить полиморфные превращения одного или обоих компонентов. Такие превращения происходят во многих промышленных сплавах, например сплавах железа, титана и др. Но в большинстве случаев эти диаграммы могут рассматриваться как состоящие из нескольких диаграмм состояния простейших типов.

Диаграммы состояния первого типа относятся к сплавам, компоненты которых А и В неограниченно растворяются один в другом в жидком состоянии и не растворяются в твердом (рис. 16, а). Выше линии *acb* сплав находится в жидком состоянии. При охлаждении сплава ниже линии *ac* (линии ликвидус) начинается кристаллизация компонента А и в области *acd* находятся жидкий сплав и кристаллы компонента А. С понижением температуры увеличивается содержание кристаллов А и, соответственно, уменьшается содержание компонента А в жидком сплаве. При температуре, соответствующей линии *dc* (линии солидус), содержание компонентов в оставшемся жидком сплаве дости-

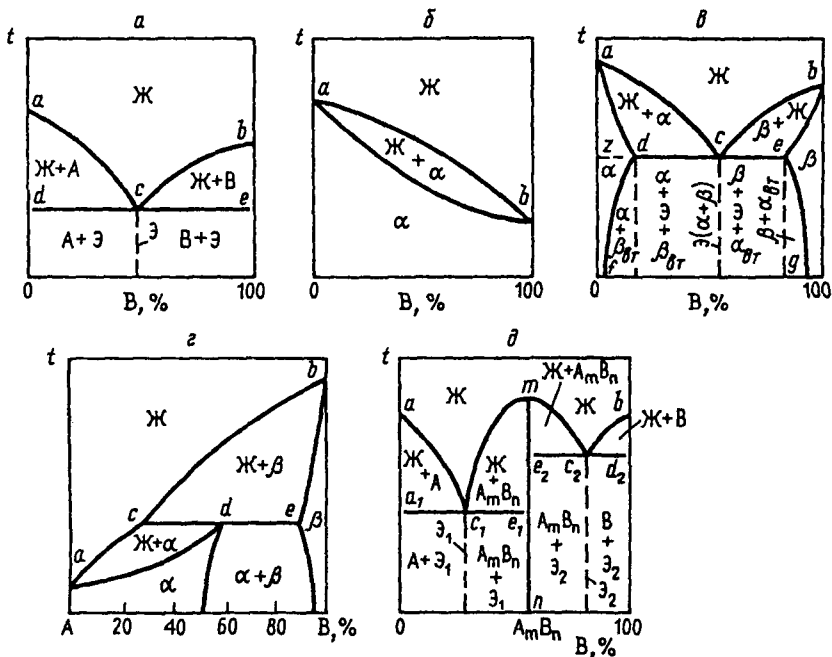


Рис. 16. Диаграммы состояния двухкомпонентных систем:

а — с образованием эвтектики; б — образующие непрерывный ряд жидких и твердых растворов; в, г — соответственно, с эвтектическим и перитектическим превращениями и ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии; д — сплавов с образованием химического соединения без превращений в твердом состоянии (Ж — жидкий сплав; Э — эвтектика; A_mB_n — химическое соединение; А и В — кристаллы, соответственно, компонентов А и В; а — твердый раствор компонента В в компоненте А; б — твердый раствор компонента А в компоненте В)

гает значений, соответствующих точке с, и происходит затвердевание жидкого сплава. При этом образуется механическая смесь из мелких, равномерно распределенных кристаллов А и В, называемая эвтектикой. При первоначальной концентрации компонентов в жидком сплаве, соответствующей эвтектической точке с, происходит сразу переход жидкого сплава в эвтектику. Кристаллизация ниже линии cb (линии ликвидус) начинается вначале с компонента В, а затем при охлаждении до температур линии ce (линии солидус) также образуется эвтектика. Ниже линии dce (линии солидус) сплавы находятся в твердом состоянии.

Микроструктуры сплавов с первым типом диаграммы состояния после равновесной кристаллизации соответствуют:

- при концентрации компонентов, соответствующей эвтектической точке с, — совокупности зерен, образованных эвтектикой двух фаз в соответствии с рис. 13, а;

• при отклонении концентрации компонентов вправо или влево от концентрации, соответствующей эвтектической точке c , — совокупности зерен эвтектики и зерен соответствующего избыточного компонента (соответственно, вправо — А, а влево — В).

Диаграммы состояния второго типа характерны для сплавов, компоненты которых неограниченно растворяются один в другом и в жидком, и в твердом состоянии (рис. 16, б). Особенность сплавов с такой диаграммой состояния — отсутствие эвтектики.

Сплавы рассматриваемой системы после равновесной кристаллизации представляют собой совокупность зерен твердого раствора, и микроструктура в принципе ничем не отличается от микроструктуры чистого металла (см. рис. 12).

Диаграммы состояния третьего типа относятся к сплавам, компоненты которых неограниченно растворимы в жидком состоянии и ограничено — в твердом. Такой тип растворимости наиболее часто встречается в металлических сплавах. При образовании ограниченных твердых растворов различают два типа диаграмм состояния: с эвтектическим и перитектическим превращениями.

На диаграмме состояния третьего типа с эвтектическим превращением (рис. 16, в) ниже линии ad образуется твердый раствор (В в А), соответственно, ниже линии be — твердый раствор (А в В). Максимальная растворимость компонента В в компоненте А в твердом состоянии соответствует отрезку zd . Линия $adceb$ — линия солидус. В точке c образуется эвтектика. С понижением температуры ниже линии солидус растворимость компонента В в компоненте А уменьшается в соответствии с линией df , поэтому из твердого раствора выпадает компонент В в виде вторичного твердого раствора $\beta_{вт}$ компонента В в компоненте А. Соответственно, ниже линии eq выпадает вторичный твердый раствор — $\alpha_{вт}$. Избыточная β -фаза чаще всего представляет собой химическое соединение. Характер возможных микроструктур сплавов после полной кристаллизации может соответствовать рис. 13.

Диаграмма состояния сплавов с перитектикой приведена на рис. 16, г. Линия acb на диаграмме соответствует линии ликвидус, а линия $adeb$ — линии солидус. Точка d характеризует максимальную растворимость компонента В в А, а точка e — предельную растворимость А в В. Линия cde называется линией перитектического превращения.

Структура сплавов с перитектическим превращением, состав которых лежит в интервале de , после окончания процесса кристаллизации состоит из перитектики, образованной хорошо развитыми кристаллами твердых растворов α и β . Кристаллизация сплавов, состав которых соответствует линии cd , начинается с выделения кристаллов β -твердого раствора. После перитектического превращения в этих сплавах из избыточной жидкой фазы кристаллизуется α -твердый раствор, и после

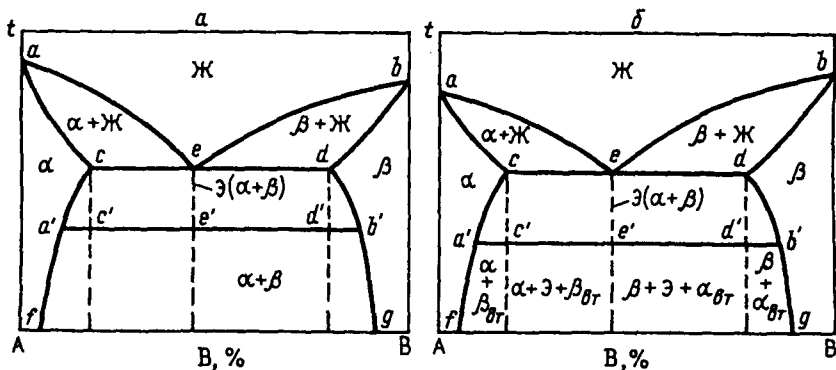


Рис. 17. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии:

a — фазовая; b — структурная. $d'e'd'b'$ — конода

затвердевания сплавы состоят только из кристаллов α -твердого раствора. В сплавах, состав которых левее точки c , кристаллизация происходит только за счет кристаллов α -твердого раствора. Для этих сплавов структурный и фазовый составы совпадают.

Диаграмма состояния двойных систем усложняется, если при определенном соотношении компонентов A и B образуется химическое соединение (рис. 16, d). Получаются как бы две диаграммы, соединенные по линии mn , соответствующей составу химического соединения. Левый фрагмент — это диаграмма состояния двухкомпонентных сплавов, состоящих из элемента A и химического соединения A_mB_n , а правый — из элемента B и химического соединения A_mB_n . Для каждого из фрагментов устанавливается собственный тип диаграммы состояния. В данном случае оба фрагмента относятся к диаграммам первого типа.

Диаграммы состояния первого и третьего типов по способу представления компонентов могут быть *фазовыми* и *структурными* (рис. 17). Вертикальные штриховые линии в этом случае, как правило, проводят для выделения областей, имеющих разный структурный состав.

Фазовый состав сплавов в любой области диаграммы состояния легко определить с помощью **коноды** — горизонтального отрезка, концы которого ограничены равновесными сосуществующими фазами и содержанием в них компонентов (рис. 17, a , линия $a'e'd'b'$), используя **правило отрезков**. Согласно этому правилу для определения массового или объемного количества фазы необходимо вычислить отношение длины отрезка коноды, прилегающего к составу альтернативной фазы, к длине всей коноды.

Используя соответствующие коноды на линиях ликвидус и солидус, можно определить содержания компонентов и в жидкой фазе, и в твердых кристаллизующихся фазах любого состава.

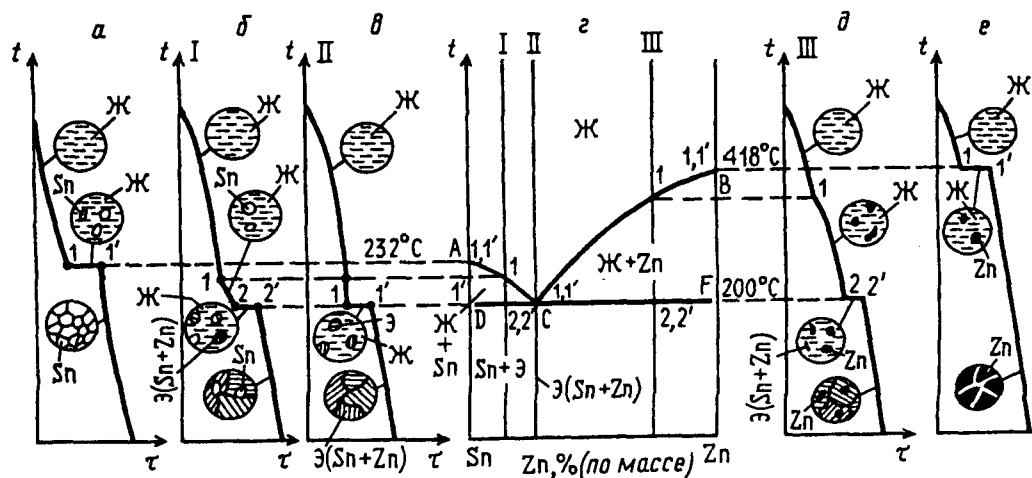


Рис. 18. Диаграмма состояния сплавов системы Sn — Zn (z) и кривые охлаждения: а — 100% Sn; б — 4% Zn + 96% Sn; в — 9% Zn + 91% Sn; д — 60% Zn + 40% Sn; е — 100% Zn. Условные обозначения фаз: Ж — жидкий раствор; Э (Zn + Sn) — эвтектика; С — число степеней свободы для различных участков кривых охлаждения

Структурный состав сплава определяется также с помощью коноды, однако ее концы должны быть ограничены линиями соответствующих структурных составляющих (рис. 17, б, линия $a'c'e'd'b'$).

Конкретный пример построения диаграммы состояния для системы «олово — цинк» с анализом ее фазового и структурного составов представлен на рис. 18. Компоненты данной системы неограниченно растворимы друг в друге в жидком состоянии, а в твердом — нерастворимы и образуют легкоплавкую эвтектику.

Следует отметить, что все описанные изменения фазового и структурного составов, происходящие при охлаждении сплавов, обратимы, т.е. они в обратном порядке совершаются также и при нагреве сплавов. Таким образом, проводить анализ фазового или структурного состояний сплавов можно и по кривым охлаждения, и по кривым нагревания.

По диаграмме состояния конкретного сплава можно определить температуры кристаллизации и превращений в твердом состоянии и структуры сплавов при любой заданной температуре. Получаемая информация позволяет примерно оценить механические, физические и химические свойства сплава и правильно подобрать режимы термической обработки, обработки давлением, сварки и др. и в конечном счете рационально выбрать материал для тех или иных изделий в зависимости от предъявляемых к ним требований.

Все возрастающее использование в технике аморфных сплавов, обладающих уникальным комплексом свойств, ставит задачу построения *мета-*

стабильных диаграмм состояния с определением областей аморфизации при заданных скоростях охлаждения расплава. Такие диаграммы необходимы для установления составов сплавов повышенной стабильности. Хотя фазовый состав аморфных сплавов не связан с диаграммой состояния, она несет важную информацию о способности сплава данного состава к аморфизации.

1.4. Полимерные вещества

1.4.1. Состав, строение и структура полимерных веществ

Строение полимерных веществ определяют *молекулы*.

Молекула — наименьшая частица вещества, обладающая его основными химическими свойствами и состоящая из атомов, соединенных между собой химическими связями. Число атомов в молекулах составляет от двух (H_2 , O_2 , HF , KCl) до сотен и тысяч.

Атомы в молекуле связаны между собой в определенной последовательности и определенным образом расположены в пространстве. Расположение атомов в молекуле всегда обладает конкретной симметрией. Наиболее общие характеристики молекулы — молекулярная масса, состав и структурная формула, указывающая последовательность химических связей.

Молекула полимерного вещества, состоящая из тысяч и более повторяющихся единиц (одинаковых или близких по строению групп атомов), называется **макромолекулой**, и ее химическое строение практически соответствует химическому строению структурной единицы. Элементами макромолекулы являются *основная цепь*, *составное звено* и *боковые группы* (рис. 19).

Под **основной цепью** полимера понимают такую последовательность химически связанных атомов, которая имеет длину, значительно превосходящую длину боковых групп.

Составное звено — выделяемая группа атомов, с помощью которой можно описывать строение всей цепи макромолекулы. Если число составных звеньев в молекуле полимера, например полиэтилена, довести до 20, то получится густая жидкость, а если до 1500—2000, то образуются твердый, но эластичный материал. Если в молекуле полимера будет 20 000—30 000 составных звеньев, то полиэтилен превращается в твердое вещество в стеклообразном состоянии.

Боковыми группами (радикалами) являются атомы (водорода, галогенов), группы атомов (OH , $-CN$, $-C_6H_5$ и др.), отрезки полимерных молекул разной длины. Боковые группы вдоль основной цепи могут располагаться беспорядочно или иметь упорядоченную расстановку. *Полимеры с упорядоченной расстановкой боковых групп называются регулярными.*

Полимер — вещество, характеризующееся многократным повторением одного или более составных звеньев, соединенных между собой

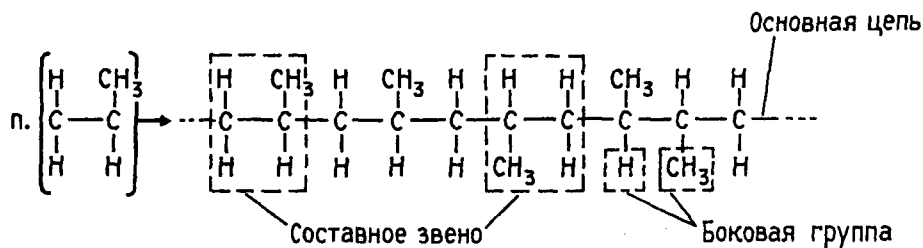


Рис. 19. Схема строения линейной макромолекулы полимера

в количестве, достаточном для проявления комплекса свойств, который остается практически неизменным при добавлении или удалении одного или нескольких составных звеньев.

По химическому составу основной цепи полимерные вещества подразделяются на *органические*, *элементоорганические* и *неорганические*.

В органических полимерных веществах — *карбоцепных полимерах* (например, каучуках) — основная цепь образована в основном углеродными атомами, но наряду с углеродом в них могут присутствовать атомы кислорода, фосфора, фтора, хлора и серы. Атомы кислорода способствуют повышению гибкости цепи, атомы фосфора и хлора повышают огнестойкость, атомы серы придают газонепроницаемость, атомы фтора сообщают полимеру высокую химическую стойкость.

Элементоорганические (гетероцепные) полимерные вещества содержат в составе основной цепи, кроме углерода, атомы неорганических элементов (Si, Ti, Al и др.), сочетающиеся с органическими радикалами CH_3 , C_6H_5 , CH_2 и др. Атомы неорганических элементов, находясь в основной цепи, существенно влияют на свойства полимеров, например увеличивают теплостойкость. Органические радикалы в таких полимерах придают материалу прочность и эластичность.

Элементоорганические полимеры в природе не встречаются. Их получают искусственным путем, например кремнийорганические соединения.

Неорганические полимеры — это полимеры, основная цепь которых не содержит углерода, а также не имеет органических боковых групп. Основная цепь неорганических полимеров составлена из оксидов кремния, алюминия, магния, кальция и др. Исключение составляют некоторые модификации углерода, представляющие собой карбоцепные неорганические полимеры (например, графит).

Неорганические полимеры отличаются большей плотностью и высокой длительной теплостойкостью, но они не могут существовать в высокоэластичном состоянии, хрупки и плохо переносят динамические нагрузки. Неорганические полимеры могут иметь природное (асбест) и искусственное (керамика) происхождение.

Макромолекулы могут быть построены из одинаковых по химическому составу (*мономеры*) или различных (*сополимеры*) составных звеньев. Для многих синтетических сополимеров (например, бутадиен-стирольных каучуков) характерно случайное распределение звеньев.

В макромолекулах реализуются следующие виды связей:

- ковалентные и водородные — между атомами основной цепи;
- вандерваальсово взаимодействие — между атомами основной цепи и боковыми группами, а также между макромолекулами в полимере в целом.

В полимерах атомы находятся в равновесном положении, что достигается при определенных значениях углов между химическими связями. Формой их теплового движения являются повороты — *крутильные колебания* — вокруг связей. Особенностью термореактивных полимеров является возникновение при нагреве между макромолекулами прочной ковалентной связи, что и превращает полимер в жесткое, неплавящееся и нерастворимое вещество.

Взаимосвязь макромолекул в значительной степени определяет свойства полимера. Наиболее сильные (до 50 кДж/моль) взаимодействия между макромолекулами осуществляются посредством водородных связей.

Макромолекулы полимеров образуют определенную *пространственную конфигурацию*. По виду различают четыре группы конфигурации (рис. 20): *линейную, разветвленную, лестничную и сетчатую*. Пространственная конфигурация макромолекул определяет физические состояния и свойства полимеров.

Линейные макромолекулы полимера представляют собой длинные зигзагообразные или закрученные в спираль цепочки (глобулы). Разветвленные макромолекулы, являясь, по сути, линейными, отличаются наличием боковых ответвлений, что препятствует их плотной упаковке (полиизобутилен). Полимеры, имеющие линейную или разветвленную конфигурации макромолекул (полиэтилен, поливинилхлорид, полистирол и др.), при нагревании способны размягчаться, а при охлаждении затвердевать (*термопласты*). Линейной конфигурации макромолекул соответствуют высокоэластичное (макромолекула обладает способностью изгибаться) и вязкое (вся макромолекула подвижна) состояния.

При лестничной конфигурации макромолекула полимера состоит из двух цепей, соединенных химическими связями. Такие полимеры имеют более жесткую основную цепь и обладают повышенной теплостойкостью, большей жесткостью, они нерастворимы в стандартных органических растворителях (кремнийорганические полимеры).

Полимеры с сетчатой пространственной конфигурацией макромолекул образуются при соединении макромолекул между собой в поперечном направлении прочными химическими связями непосредственно или через боковые группы. В результате образуется сетчатая структура с различной

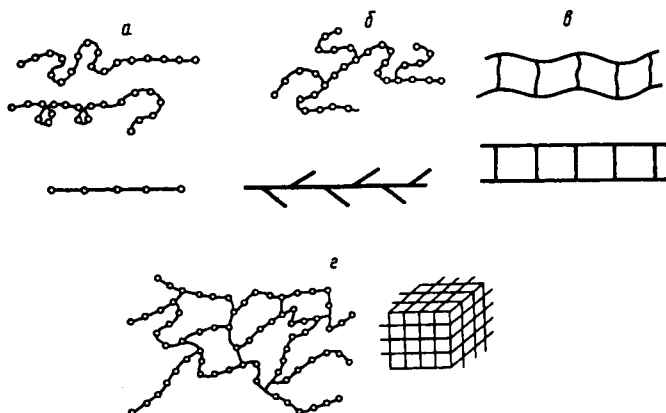


Рис. 20. *Формы пространственной конфигурации макромолекул полимеров:*
а — линейная; б — разветвленная; в — лестничная; г — сетчатая

густотой сетки. Редкосетчатые полимеры — *сетчатые полимеры* — теряют способность растворяться и плавиться, они обладают упругостью (мягкие резины). К сетчатым полимерам относятся также *пластинчатые полимеры* (например, графит). Густосетчатые полимеры — *пространственные полимеры* — отличаются твердостью, повышенной теплостойкостью, нерастворимостью. Пространственные полимеры (фенолоформальдегидные, карбамидные, полиэфирные и др.) находятся только в стеклообразном состоянии и являются термореактивными, они не могут обратимо изменять свои свойства и при нагревании превращаются в неплавкие и нерастворимые вещества, не способные к повторному формированию.

При сетчатой конфигурации макромолекул в полимерах реализуется *надмолекулярная структура*, т.е. определенные формы упорядочения: *глобулы (клубки), пачки, ленты и пластины*. Упорядоченность в структурообразовании зависит от гибкости линейных и разветвленных макромолекул, их способности менять форму, перемещаться по частям; большое влияние в данном случае оказывают жесткость цепи и силы межмолекулярного притяжения.

Надмолекулярная структура определяет фазовое состояние полимеров (рис. 21), при этом глобулам соответствует аморфное состояние, а пластинам — кристаллическое.

Надмолекулярные структуры в кристаллическом полимере — это кристаллы (зерна) разных формы и размеров, но с одинаковой кристаллической решеткой. Такие кристаллы являются типичными надмолекулярными структурами у регулярных полимеров. Для кристаллических полимеров характерны высокие температура плавления, плотность, прочность, жесткость, теплостойкость и низкие показатели растворимости, набухания, плохие прозрачность и проницаемость.

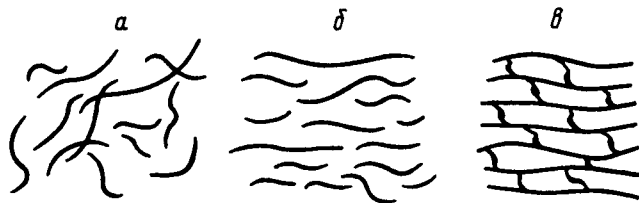


Рис. 21. Схемы состояния макромолекул линейных полимеров:
а — аморфное беспорядочное; *б* — аморфное ориентированное; *в* — кристаллическое

Аморфные полимеры характеризуются ближним упорядочением в расположении звеньев или сегментов макромолекул, быстро исчезающим по мере их удаления друг от друга. Например, это разные укладки цепных макромолекул, расположенных последовательно, в пачки. Пачки являются структурными элементами и способны перемещаться относительно друг друга. Некоторые аморфные полимеры могут быть построены из глобул (*глобулярная структура*). Глобулярная структура полимеров определяет невысокие механические свойства полимерного материала (хрупкое разрушение по границам глобул).

В большинстве случаев реальные полимеры содержат и аморфную, и кристаллическую фазы. Относительное содержание этих фаз зависит от формы цепи, величины межмолекулярных сил и внешних условий. Содержание в полимере (в процентах) веществ в кристаллическом состоянии называется *степенью кристалличности*. Образование кристаллитов приводит к потере полимером эластичности, увеличению его жесткости и уменьшению способности к деформации. Надмолекулярные структуры могут изменяться при внешнем воздействии.

1.4.2. Понятия о классификациях полимерных материалов

К группе однородных полимерных веществ относятся *мономер*, *олигомеры*, *смолы* и собственно *полимеры*.

Мономер — вещество, каждая молекула которого может образовывать одно или несколько составных или повторяющихся звеньев.

Олигомер — вещество, молекулы которого содержат составные звенья, соединенные друг с другом повторяющимся образом, комплекс его свойств изменяется при добавлении (или удалении) одного или нескольких составных звеньев.

Смола — твердый, полутвердый или псевдотвердый органический материал, который имеет неопределенную и обычно относительно высокую молекулярную массу и под воздействием тепла размягчается или плавится в определенном диапазоне температур.

Деление на мономеры, олигомеры, смолы и полимеры проводят также по величине их *относительной молекулярной массы*, которая соот-

ветствует: для мономеров — менее 5000 атомных единиц массы (а.е.м.); для смол и олигомеров — более 5000 а.е.м.; для полимеров — более 10000 а.е.м.

Классификации однородных полимерных веществ учитывают *происхождение, физическое состояние, электрические свойства и отношение к нагреву*.

По происхождению однородные полимерные вещества (полимеры) делят на *природные и искусственные (синтетические)*.

Природные полимеры — это белки и нуклеиновые кислоты, из которых построены клетки живых организмов; природные смолы (янтарь, копал, шеллак); натуральный каучук; минералы (целлюлоза, слюда, асбест, природный графит и др.).

Синтетические полимеры образуются в результате *химического синтеза*. Существуют два основных метода их получения — *полимеризация и поликонденсация*.

Химический синтез — целенаправленное получение сложных веществ из более простых, основанное на знании молекулярного строения и реакционной способности последних.

Полимеризация — процесс синтеза молекул низкомолекулярного вещества (мономера), при котором взаимодействие молекул мономеров не сопровождается выделением каких-либо побочных продуктов. В полимеризации могут участвовать один или несколько (*сополимеризация*) полимеров.

Поликонденсация — процесс синтеза, в результате которого образуются высокомолекулярные соединения (*поликонденсаты*) с одновременным выделением побочных низкомолекулярных соединений. Например, при поликонденсации фенола с формальдегидом получают фенолоформальдегидная смола и вода.

По физическому состоянию выделяют полимеры *стеклообразного, высокоэластичного и вязкотекучего состояний*. Из-за высокой молекулярной массы полимеры не способны образовывать низковязкие жидкости или переходить в газообразное состояние.

По электрическим свойствам полимеры делятся на *полярные и неполярные*. Полярность определяется наличием диполей и отсутствием симметрии в их строении. В неполярных полимерах дипольные моменты связей атомов скомпенсированы, поэтому они являются высококачественными диэлектриками.

По отношению к нагреву рассматривают *термопластичные и термореактивные полимерные вещества*.

Термопластичными называют такие полимеры или пластмассы, которые с повышением температуры размягчаются, плавятся, при формовании не претерпевают никаких химических изменений, по мере охлаждения затвердевают и сохраняют способность пластически деформироваться при повторном нагреве.

Термореактивными называют такие полимеры и пластмассы, которые при нагреве и формовании претерпевают существенные химические изменения, затвердевают и теряют способность пластически деформироваться при повторном нагреве.

1.4.3. Общая характеристика каучуков

Каучук — натуральное или синтетическое непереломное, высокомолекулярное (карбоцепное) термопластичное соединение с двойной химической связью между углеродными атомами в элементарных звеньях макромолекулы. Молекулы каучука извилистые (зигзагообразные). Структура макромолекул — линейная или слабоветвленная, состоит из отдельных звеньев. Молекулярная масса каучуков $M = 400\,000 \dots 450\,000$ а.е.м.

Натуральный каучук (НК) — эластичный природный материал, полимер изопрена $(C_5H_8)_n$, получаемый коагуляцией *латекса* каучуконосных растений. Резины на основе НК отличаются высокой эластичностью, прочностью, водо- и газонепроницаемостью, высокими электроизоляционными свойствами.

Латекс — млечный сок каучуконосных растений. В латексе диспергированы высокомолекулярные углеводороды и растворены углеводы, белки и соли.

Синтетические каучуки (СК) — эластичные синтетические полимеры, получаемые полимеризацией различных углеводородов. В настоящее время применяются в промышленности более 250 видов синтетических каучуков, из которых изготавливают свыше 50 тыс. изделий различных наименований.

Бутадиеновые каучуки (дивиниловые каучуки, СКБ, СКД) — это эластичные синтетические полибутадиены. Формула полибутадиена $(C_4H_6)_n$. Он является некристаллизующимся каучуком и имеет низкий предел прочности при растяжении, поэтому в резину на его основе необходимо вводить упрочняющие наполнители. Каучуки СКБ и СКД используются в производстве морозостойких резин — СКД применяют главным образом в производстве шин (превосходят по качеству шины из натурального каучука), а из СКБ изготавливают, например, кислото- и щелочестойкую резину, эбонит.

Бутадиен-нитрильные каучуки (дивинилнитрильные каучуки, стирольные каучуки, СКН, БНК) — синтетические полимеры, продукты сополимеризации бутадиена с нитрилом акриловой кислоты: $[-CH_2-CH=CH-CH_2-]_n - [-CH_2-CH(CN)-]_m$. Резины на основе СКН обладают высокой прочностью, хорошо сопротивляются истиранию, превосходят резины на основе НК по стойкости к старению и действию разбавленных кислот и щелочей, но уступают им по эластичности. Резины из БНК бензо- и маслостойки.

Бутадиен-стирольные каучуки (дивинилстирольные каучуки, стирольные каучуки, СКС, БКС) — синтетические полимеры, получаемые при сополимеризации бутадиена со стиролом $[-CH_2-CH=CH-CH_2-]_n-[-CH_2-CH(C_6H_5)-]_m$. Процентное содержание стирола сильно влияет на свойства каучуков. Так, например, чем больше стирола, тем выше прочность, но ниже морозостойкость. Из наиболее распространенного каучука СКС-30 получают резины с хорошим сопротивлением старению и хорошо работающие при многократных деформациях. По газонепроницаемости и диэлектрическим свойствам они равноценны резинам на основе НК. Прочность и износостойкость резины из БКС позволяет использовать ее при производстве автомобильных шин, конвейерных лент, резиновой обуви.

Винилпиридиновые каучуки — синтетические полимеры, продукты сополимеризации диеновых углеводородов с винилпиридинами, главным образом бутадиена с 2-метил-5-винилпиридином $[-CH_2-CH=CH-CH_2-]_n-[-CH_2-CH(C_5H_3NCH_3)-]_m$. Резины из винилпиридиновых каучуков масло-, бензино- и морозостойки, имеют хорошую адгезию к различным материалам. Применяются преимущественно в виде латекса для пропитки шинного корда.

Изопреновые каучуки (СКИ) — синтетические полиизопрены, продукты полимеризации изопрена (C_5H_8). Резины из изопреновых каучуков отличаются высокой механической прочностью и эластичностью и являются заменителями натурального каучука в производстве шин, конвейерных лент, резиновой обуви, бытовых изделий. Промышленностью выпускаются каучуки СКИ-3 и СКИ-ЗП, наиболее близкие по свойствам к НК; СКИ-ЗД используется для получения электроизоляционных резин, СКИ-ЗВ — для вакуумной техники и др.

Карбоксилатные каучуки — синтетические полимеры, продукты сополимеризации бутадиена с непредельными карбоновыми кислотами, главным образом метакриловой $[-CH_2-CH=CH-CH_2-]_n-[-CH_2-C(CH_3)(COOH)-]_m$. Резины из карбоксилатных каучуков прочны, теплостойки, отличаются высокой адгезией к различным материалам. Применяются в составе клеев для крепления резины к металлу, в виде латекса — для пропитки шинного корда, отделки кожи, бумаги, тканей.

Кремнийорганические каучуки (силиконовые каучуки, СКТ) — синтетические кремнийорганические полимеры с химической формулой $...-Si(CH_3)_2-O-Si(CH_3)_2-...$. Применяются в производстве оболочек проводов и кабелей, трубок для переливания крови и др.

Полисульфидные каучуки — синтетические полимеры, продукты поликонденсации: $[-CH_2CH_2-S_x-]_n$. Резины из полисульфидных каучуков бензо- и маслостойки, газонепроницаемы. Применяются для производства шлангов, диафрагм, в жидком виде — основа герметиков. **Тиокол** — полисульфидный каучук, образующийся при взаимодействии галогенопроизводных углеводородов с многосернистыми соединениями щелочных металлов: $...-CH_2-CH_2-S_2-S_2-...$. Механические свойства резин на основе тиокола невысокие, но это хороший герметизирующий материал.

Фторсодержащие каучуки (фторкаучуки) — синтетические полимеры, продукты полимеризации фторорганических соединений, главным образом смеси винилиденфторида с трихлорфторэтиленом $[-\text{CH}_2-\text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{CFCl}-]_n$ или с гексафторпропиленом $[-\text{CY}_2-\text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{CF}(\text{CF}_3)-]_n$. Резины из фторкаучука термостойки, негорючи, устойчивы к окислителям, маслам, топливам. Применяются главным образом в производстве различных уплотнителей, эксплуатируемых при температуре выше 200°C.

Хлоропеновые каучуки (наирит, неопрен) — синтетические полимеры, продукты полимеризации хлоропрена: $[-\text{CH}_2=\text{CCl}=\text{CH}-\text{CH}_2-]_n$. Резины из хлоропеновых каучуков атмосферо-, масло- и бензиностойки. Применяются в производстве конвейерных лент, ремней, рукавов, клеев и др. **Наирит** — хлоропеновый каучук $(\text{CH}_2=\text{CCl}-\text{CH}=\text{CH}_2)$. Резины на основе наирита обладают высокой эластичностью, озоностойкостью, устойчивы к действию топлива и масел, хорошо сопротивляются старению. Они не уступают по термо- и морозостойкости (до -40°C), а также в электроизоляционных свойствах резинам на основе НК.

Этиленпропиленовые каучуки — синтетические полимеры, продукты сополимеризации этилена с пропиленом (СКЭП), а иногда с третьим мономером — диеном (СКЭПТ). Резины из этиленпропиленовых каучуков атмосферостойки, химически устойчивы, очень хорошие диэлектрики. Применяются для изоляции проводов и кабелей, в производстве автомобильных прокладок и др.

Разновидностью каучуков являются **жидкие каучуки** — жидкие синтетические олигомеры. Выпускаются бутадиеновые, кремнийорганические, полисульфидные и другие жидкие каучуки. Они применяются для приготовления герметиков, клеев, получения электроизоляционных и антикоррозионных покрытий.

1.4.4. Общая характеристика высокомолекулярных полимеров

1.4.4.1. Термопластичные полимеры

Полиэтилен $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$, полипропилен $[-\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)-]_n$ и полиизобутилен $[-\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)_2-]_n$ входят в группу полиолефинов — синтетических высокомолекулярных полимеров на основе непредельных углеводородов. Они являются неполярными термопластичными полимерами аморфно-кристаллического строения с молекулами линейной или разветвленной формы.

Полиэтилен — синтетический полимер, продукт полимеризации этилена; твердое вещество белого цвета. Различают полиэтилен низкой (35...65% кристаллической фазы) и высокой (60...95% кристаллической фазы) плотности. Влияние на плотность оказывает технология производства полиэтилена: соответственно, полиэтилен низкого давления — ПЭНД (ГОСТ 16337—77) и полиэтилен высокого давления — ПЭВД (ГОСТ 16338—85).

Полиэтилен прочен, эластичен, хороший диэлектрик. Для него характерны низкая растворимость в органических растворителях и устойчивость к действию кислот, щелочей и солей, высокая водостойкость, стойкость к растрескиванию; он морозостоек (до -70°C) и устойчив к радиоактивным излучениям. Недостатками полиэтилена являются низкая теплостойкость (80°C), плохая адгезия к клеям, подверженность старению и пожиряемость грызунами. Из него изготавливают ненагруженные детали (контейнеры, емкости, вентили, детали химических насосов, трубы для транспортирования агрессивных жидкостей), защитные покрытия на металлах, пленку для различных целей (электроизоляционную, парниковую и т.д.), технические волокна и многое другое.

Полипропилен ($-\text{CH}_2-\text{CHCH}_3-$), не уступая полиэтилену по водо- и химической стойкости, превосходит его по теплостойкости (до 150°C) и механическим свойствам. Его недостатками являются низкая морозостойкость ($-10...20^{\circ}\text{C}$) и интенсивное старение. Из полипропилена изготавливают некоторые конструкционные детали автомобилей, мотоциклов, корпуса насосов, трубы для транспортирования агрессивных сред, пленки, емкости.

Изделия из полиэтилена и полипропилена легко свариваются и подвергаются механической обработке.

Полиизобутилен — мягкий эластичный полимер, который, в отличие от каучуков, не способен вулканизироваться. По химической стойкости и прочностным показателям полиизобутилен уступает полиэтилену и полипропилену, значительно превосходя их по эластичности. Применяют полиизобутилен для гидроизоляции строительных конструкций, герметизации швов в бетонных и железобетонных конструкциях, для изготовления клеев и мастик.

Полистирол $[-(\text{C}_6\text{H}_5)\text{CH}-\text{CH}_2-]_n$ — синтетический полимер; твердое стеклообразное вещество (прозрачный аморфный полимер стирола); диэлектрик, стоек химически (абсолютно стоек к воде), нерастворим в растворителях; обладает хорошими технологическими свойствами и не имеет хладнотекучести. Для полистирола характерна высокая прозрачность (пропускает до 90% лучей видимой части спектра). Основные недостатки полистирола — его хрупкость и плохая устойчивость к действию ряда органических растворителей, низкая (до 80°C) теплостойкость, склонность к старению. Из полистирола (ГОСТ 20282—86) изготавливают в основном пенопласты — пенополистирол (для звуко- и теплоизоляции), а также детали машин и приборов (ручки, корпуса и др.), емкости и сосуды для химикатов, облицовочные плитки, пленки и др. Ударопрочный полистирол (УПС) (ГОСТ 19784—74) получают сополимеризацией стирола с каучуком и применяют для изготовления деталей (корпусов) в электро- и радиотехнической промышленности, различных

сосудов, аккумуляторных баков, щелевых фильтров в авто- и самолетостроении.

Поливинилхлорид ($-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$) — полярный, аморфный полимер винилхлорида. Благодаря высокому содержанию хлора он не воспламеняется и не горит. При $130\ldots 170^\circ\text{C}$ идет разложение поливинилхлорида, сопровождающееся выделением хлористого водорода, который вызывает коррозию металлической арматуры, но зато обладает дугогасящим свойством. Пластические массы на основе поливинилхлорида выпускают (ГОСТ 14332—78) в виде жестких материалов, не содержащих пластификаторов, — *винипласт* и мягких, содержащих пластификаторы — *пластикат*.

Винипласт обладает высокой химической стойкостью. Его применяют для изготовления различных деталей химического оборудования, труб, деталей вентиляционных и теплообменных установок, муфт, элементов насосов, вентиляторов, защитных покрытий на металлах, а также как электроизоляционный материал в низковольтной электротехнике.

Пластикат находит широкое применение для изготовления труб, конвейерных лент, печатных валиков, различных линолеумов, плиток, гидроизоляционных и декоративных пленок, а также в электротехнической промышленности для изоляции и оболочек проводов и кабеля. Хлорированием поливинилхлорида до содержания $60\ldots 80\%$ Cl получают *перхлорвинил* — материал, легко растворимый в органических растворителях и применяемый для изготовления красок.

Поливинилацетат (ГОСТ 18992—80) — полимер винилацетата $\text{CH}_2-\text{CH}(\text{O}-\text{C}(=\text{O})\text{CH}_3)$, синтезируемого из ацетилена и уксусной кислоты. Благодаря хорошей адгезии, эластичности, светостойкости и бесцветности поливинилацетат широко применяется в производстве лаков, красок и клеев. В виде водной эмульсии его применяют также для полимерцементных бетонов, в производстве влагостойких обоев.

Фторопласты — общее название синтетических термопластичных полимеров — продуктов полимеризации фторпроизводных олефинов. Это фторосодержащие полимеры винильного типа, имеющие высокую степень кристалличности ($93\ldots 97\%$).

Наиболее распространенные фторопласты: фторопласт-4 (ГОСТ 10007—80), фторопласт-4М (ГОСТ 14906—77), фторопласт-3 (ГОСТ 13744—87). Фторопласт-3 (политрифторхлорэтилен) при нагреве выше 210°C переходит в вязкотекучее состояние, а при температурах выше $310\ldots 315^\circ\text{C}$ разлагается. Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) при нагреве выше 327°C переходит в аморфное состояние. При быстром охлаждении в этих материалах понижается степень кристалличности, т.е. происходит закалка.

Фторопласты химически стойки по отношению ко всем кислотам и щелочам, не поглощают воду, имеют высокие теплостойкость и диэлектри-

ческие свойства, низкий коэффициент трения. К недостаткам фторопластов относятся низкие механические свойства, хладнотекучесть. Фторопласты применяются для подшипников скольжения, прокладок, уплотнителей, деталей химического машиностроения, как антикоррозионные покрытия на металлах. Фторопласт-4 не горит, имеет высокие диэлектрические свойства, которые практически не зависят ни от частоты, ни от температуры. Изделия из него широко применяют в авиационном, электротехническом, радиотехническом, химическом машиностроении.

Полиакрилаты — синтетические полимеры акриловой и метакриловой кислот и их производных; бесцветные, клейкие, каучукоподобные или твердые вещества. Полиакрилаты имеют высокую химическую, тепло- и водостойкость, прозрачны и способны пропускать ультрафиолетовые лучи. Применяются в производстве листовых и рулонных материалов. Полиакрилат Д-3 обладает высокой термической и жаростойкостью и используется для различных антифрикционных деталей. Наибольшее применение находит полимер метакриловой кислоты — полиметилметакрилат (*органическое стекло*). На основе полиметилметакрилата изготавливают самоотверждающиеся пластмассы типа стиракрила, которые используют в производстве штампов, литейных моделей, абразивного инструмента.

Полиуретаны — синтетические полимеры, содержащие в молекуле группы $-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$; вязкие жидкости или твердые вещества. Прочны, износостойки, устойчивы к кислотам, маслам, бензину. Применяются в производстве полиуретанового волокна, пенопластов, клеев, лаков. Эластичные полиуретаны (уретановые каучуки) — основа износостойкой резины. Полиуретан ПУ-1 химически стоек, рабочие температуры — от -60 до $+100^\circ\text{C}$.

1.4.4.2. Термореактивные полимеры

Фенолоальдегидные полимеры (ГОСТ 18694—80) — твердые продукты поликонденсации фенолов с альдегидами, например формальдегидом $[-\text{CH}_2-\text{O}-]_n$. При определенном соотношении фенола и альдегидов получают либо термопластичные (*новолачные*), либо термореактивные (*резольные*) полимеры.

Фенолоальдегидные полимеры используются в качестве связующего вещества для производства слоистых пластиков, клеевых композиций, газонаполненных пластмасс, изделий из минеральной ваты. Для производства строительных материалов и изделий более широкое применение находят резольные олигомеры и полимеры. Затвердевание их при нормальной температуре происходит с помощью катализаторов — слабых кислот.

Аминоальдегидные полимеры — продукты поликонденсации аминов с альдегидами. Более широкое применение нашли карбамидно- и меламиноформальдегидные полимеры. Их изготавливают в виде водных растворов или эмульсий. Они затвердевают при повышенной температуре, а при нормальной — требуются ускорители затвердевания (органические или минеральные кислоты). При холодном затвердевании образуются менее прочные и водостойкие полимеры. Область применения аминоальдегидных полимеров примерно такая же, как и фенолоальдегидных.

Полиформальдегид $[-CH_2-O-]_n$ — синтетический полимер, продукт полимеризации формальдегида; твердое вещество белого цвета. Отличается большой жесткостью, усталостной прочностью, малой усадкой при переработке, низкой ползучестью; износо- и влагостоек, устойчив к щелочам, растворителям. Применяется главным образом вместо цветных металлов и сплавов в производстве конструкционных деталей, а также для изготовления пленки и технического волокна.

Полиамиды (капрон, нейлон и др.) — полярные пластмассы на основе кристаллизующегося полимера, содержащего группы CO , NH и CH_2 ; твердые роговидные или прозрачные стеклообразные вещества. Они имеют высокую температуру плавления; характеризуются большой прочностью, высокими теплостойкостью, износостойкостью, стойкостью в маслах, бензине, щелочах, низкими коэффициентом трения ($f < 0,05$) и способностью гасить вибрации. Недостатки полиамидов — склонность к старению и некоторая гигроскопичность. Полиамиды находят широкое применение в машиностроении, электротехнике, медицине для изготовления подшипников, втулок, зубчатых передач, кулачков, зажимов, клапанов, прокладок, антифрикционных и декоративных покрытий и др.

Фурановые полимеры получают поликонденсацией фурфурола, фурилового спирта и ацетона. Практическую значимость имеют фурфурол-ацетоновые полимеры — в присутствии бензосульфокислоты или при нагревании до $180...200^\circ C$ они переходят в неплавкое и нерастворимое состояние.

Достоинствами фурановых полимеров являются высокая ($300...400^\circ C$) теплостойкость и хорошая совместимость с другими полимерами, битумами и синтетическими каучуками. При их применении следует учитывать большую усадку при затвердевании.

Фурановые полимеры используют для получения полимерных бетонов, защитных лаков, клеев и мастик. Из прессованных материалов изготавливают различные детали, трубы, арматуру.

Эпоксидные полимеры — продукты поликонденсации эпихлоргидрина с дифенилопропаном, содержащие эпоксидную группу. Перевод эпоксидных полимеров при нормальной и повышенной температурах в нерастворимое и неплавкое состояния осуществляют с помощью отверди-

телей. Эпоксидные полимеры отличаются хорошей адгезией к разнообразным материалам, незначительная усадка, высокие показатели прочности.

Из эпоксидных полимеров изготавливают эффективные водо- и химически стойкие клеи для склеивания разнообразных материалов, их применяют как связующее для стеклопластиков, полимербетонов.

Кремнийорганические полимеры (полиоксаны, силиконы) — синтетические элементоорганические высокомолекулярные полимеры, содержащие в главной цепи атомы кремния и кислорода, а атомы углерода — в составе боковых групп, связанных с атомом кремния. В зависимости от молекулярной массы кремнийорганические полимеры — вязкие бесцветные жидкости (жидкости кремнийорганические), твердые эластичные вещества (кремнийорганические каучуки) или хрупкие продукты (кремнийорганические полимеры).

Кремнийорганические полимеры характеризуются высокой термо- и теплостойкостью (более 400°C), а также водостойкостью, эластичностью, морозостойкостью, устойчивостью к окислению, физиологической инертностью, гидрофобностью. Эти полимеры имеют хорошие диэлектрические характеристики. Недостатками их являются невысокая механическая прочность и слабая адгезия к другим материалам.

Кремнийорганические полимеры применяют для производства герметиков, жаростойких лаков и эмалей, пенопластов, стеклопластиков, деталей электротехнических приборов. Кремнийорганические жидкости используются в качестве гидравлических, гидрофобизаторов смазок и др.

1.5. Композиционные материалы

Комбинирование различных веществ остается сегодня одним из основных способов создания новых материалов, свойства которых и количественно, и качественно отличаются от свойств каждого из составляющих его веществ.

Композиционные материалы (композиты) — искусственные материалы, полученные из двух или более компонентов с сохранением индивидуальности каждого отдельного компонента. К композиционным материалам относятся также сплавы с направленной кристаллизацией эвтектических структур.

Характерные признаки композиционных материалов:

- состав и форма компонентов материала определены заранее;
- компоненты присутствуют в количествах, обеспечивающих заданные свойства материала;
- композиционный материал является многофазной системой, однородной в макромасштабе и неоднородной — в микромасштабе (компоненты различны по свойствам, и между ними существует явная граница раздела).

В композиционных материалах приняты следующие наименования компонентов:

- *матрица* — компонент, обладающий непрерывностью по всему объему материала;
- *упрочнитель*, усиливающий (армирующий) компонент — компонент прерывный, распределенный особым образом в объеме композиции.

Армирование — усиление материала элементами (арматурой) из другого, более прочного материала. Композиционные материалы могут содержать два и более различных упрочнителя. В этом случае они называются *полиармированными композиционными материалами*.

Если композиционные материалы состоят из трех и более компонентов, они называются *гибридными композиционными материалами*.

Механические свойства композиционных материалов определяются в основном следующими параметрами: высокой прочностью упрочнителя; жесткостью матрицы; размерами, формой и пространственным распределением упрочнителя и прочностью связи на границе матрица — упрочнитель.

Композиционные материалы классифицируют *по природе матрицы, природе упрочнителя, характеру взаимодействия упрочнителя с матрицей, форме элементов упрочнителя, конструктивному признаку упрочнения и назначению*.

По природе матрицы и упрочнители могут быть *полимерными, металлическими и минеральными*. Разновидностью полимерной матрицы является *углеродная матрица*, получаемая карбонизацией или графитизацией полимерной матрицы. В наименовании композиционных материалов часто фигурирует природа упрочнителя и матрицы (стеклопластики, карбопластики, боропластики и др.).

От природы матрицы зависят физико-химические, эксплуатационные и технологические свойства материала. Так, матрица должна обеспечить теплофизические, механические, электрические свойства, химическую и коррозионную стойкость, уровень рабочих температур, возможность совместной работы с упрочнителем при различных видах нагружения, работоспособность, характер изменения свойств под воздействием среды. К технологическим свойствам упрочнителя относят смачиваемость волокна, формуемость и др.

По характеру взаимодействия упрочнителя с матрицей различают *активные и инертные упрочнители*. Отсутствие взаимодействия между упрочнителем и матрицей существенно повышает трещиностойкость композиционного материала.

По форме элементов различают упрочнители:

- *порошкообразные (дисперсные)* — соотношение двух размеров элемента упрочнителя, взятых по взаимно перпендикулярным направлениям, близко к единице (шары, гранулы и т.п.);

- *волокнистые* — величина отношения длины к толщине элемента упрочнителя равна 10 и более (нити, волокна, проволоки, ленты и т.п.). Чем больше величина отношения длины к толщине волокна, тем выше степень упрочнения материала. В качестве волокнистых упрочнителей применяются высокопрочные стеклянные, углеродные, борные и органические волокна, металлические проволоки, а также волокна и нитевидные кристаллы ряда карбидов, оксидов, нитридов и других соединений. Волокна для композиционных материалов обычно используются в виде пучков в той или иной текстильной форме (нити, жгуты и др.). Существует понятие *критической длины волокон*. Если она не меньше определенной величины (обрезки волокон), то композиционный материал лишь незначительно уступает по прочности композиции с непрерывными волокнами. Обрезки волокон, применяемые для упрочнения, получили название — **фибры**;

- *слоистые (листовые)* — отношение площади элемента упрочнителя к его толщине практически стремится к бесконечности (листы, полотна, ткани и др. на основе высокопрочных волокон различной природы). Композиционные материалы, у которых входящие в композицию элементы выполнены в виде слоев, называются *слоистыми*. Применяя соответствующие материалы, можно получать слоистые материалы с заданным сочетанием механических, теплофизических, химических и других свойств.

Форма элементов упрочнителя во многом определяет физические свойства композиционных материалов. Так, для материалов с порошкообразными упрочнителями характерны изотропность свойств, высокие твердость и предел прочности на сжатие, а для листовых упрочнителей — анизотропия свойств, высокий предел прочности на изгиб. Для расширения комплекса свойств или усиления какого-либо свойства для армирования одновременно используют наполнители различной формы.

По конструктивному признаку упрочнения (рис. 22) различают *композиционные материалы с хаотическим упрочнением, одномерно-, двумерно- и пространственно армированные*. Композиционные материалы, одномерно армированные непрерывными волокнами, называются *волокнистыми*, а двумерно армированные тканями — *текстолитами*. При армировании возможны различные схемы укладки упрочнителя (волокон), которые приведены на рис. 23.

По назначению композиционные материалы делятся на *конструкционные, инструментальные, электротехнические* и др.

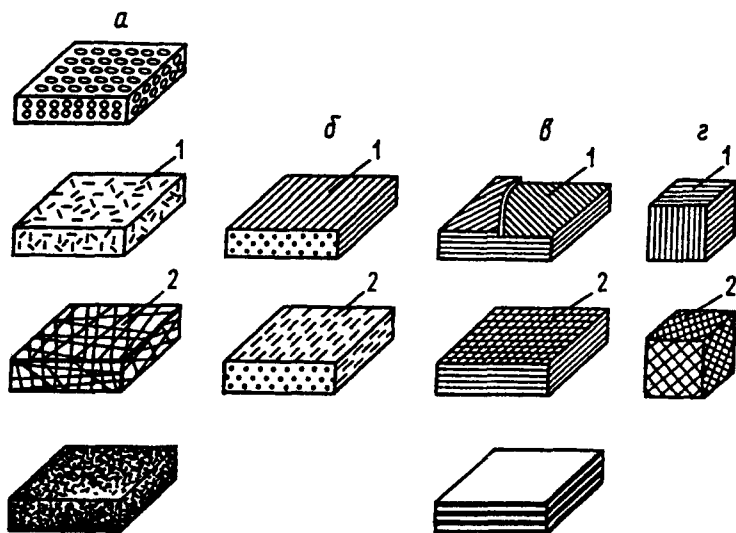


Рис. 22. Классификация композитов по конструктивному признаку:
а — хаотически армированные (1 — короткие волокна; 2 — непрерывные волокна);
б — одномерно армированные (1 — однонаправленные непрерывные; 2 — однонаправленные короткие);
в — двумерно армированные (1 — непрерывные нити; 2 — ткани);
г — пространственно армированные (1 — три семейства нитей; 2 — n семейств нитей)

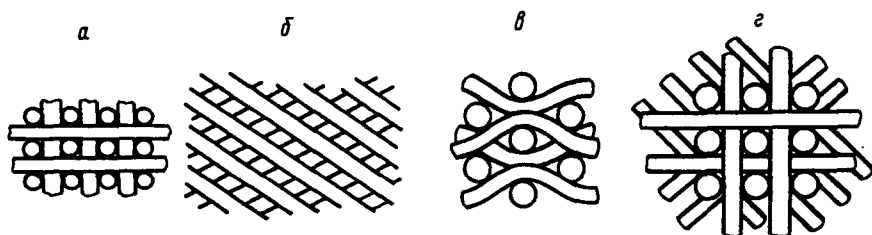


Рис. 23. Схемы укладки волокон при армировании:
а — прямоугольная; *б* — косоугольная; *в* — с искривленными волокнами; *г* — система из n нитей

1.6. Физические свойства

Физические свойства — внутренние, присущие данному материалу или веществу особенности, обуславливающие его различие или общность с другими веществами или материалами и проявляющиеся как ответная реакция на воздействие внешних физических полей или сред.

Свойства материала всегда оценивают числовыми показателями, которые устанавливают путем испытаний. Для получения сопоставимых данных, которыми можно воспользоваться при выборе и оценке мате-

риалов в инженерной практике, испытания обязательно проводят единообразно и в соответствии с требованиями государственных стандартов.

Физические свойства, определенные стандартными методами с указанием состава, строения и структуры, представляют собой *стандартные справочные данные веществ и материалов*. Порядок разработки и аттестации стандартных справочных данных (ССД) о физических константах и свойствах веществ и материалов установлен в Правилах по межгосударственной стандартизации (ПМГ 28—99).

1.6.1. Физические величины, характеризующие агрегатное состояние вещества

Физическими величинами, характеризующими агрегатное состояние вещества, являются *температура* и *плотность*.

Температура — физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия системы.

Температурный диапазон физических явлений исключительно широк: практически от абсолютного нуля до 10^{11} К и выше.

Температура тела независимо от его массы и химического состава характеризует энергию, с которой движутся молекулы. Переход вещества в агрегатное состояние, отвечающее более высокой температуре, требует подвода энергии, а переход в агрегатное состояние, отвечающее более низкой температуре, сопровождается выделением энергии. Возможные переходы из одного агрегатного состояния в другое представлены на рис. 24.

В твердых телах характер плавления определяется их строением. Так, в кристаллических веществах плавление (кристаллизация) происходит при определенной, зависящей от внешнего давления *температуре плавления*. При этом в процессе плавления (кристаллизации) температура тела не меняется.

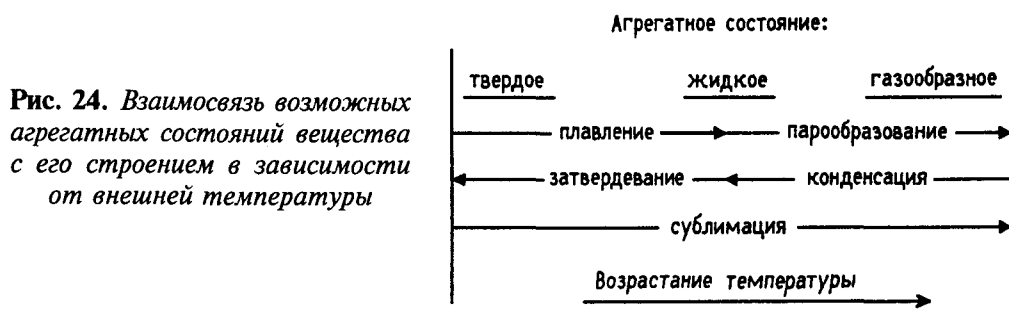


Рис. 24. Взаимосвязь возможных агрегатных состояний вещества с его строением в зависимости от внешней температуры

Температура плавления ($T_{пл}$) — температура равновесного фазового перехода твердого кристаллического вещества в жидкое состояние при постоянном внешнем давлении. Температура плавления при нормальном атмосферном давлении (101 325 Па, или 760 мм рт.ст.) называется точкой плавления. Температура обратного перехода из жидкого состояния в твердое кристаллическое вещество называется *температурой затвердевания*.

Температуры плавления сплавов обычно ниже температуры плавления самого легкоплавкого компонента, а температура затвердевания раствора понижается с увеличением концентрации растворенного вещества, и это понижение пропорционально числу растворенных молекул.

Материалы с преимущественно аморфным строением, такие, как стекло и высокомолекулярные полимеры, характеризуются не точкой, а периодом размягчения (см. рис. 6), для которого самой низкой температурой является *температура размягчения* T_p . Другой характеристической температурой для аморфных материалов является *температура стеклования*.

Температура стеклования ($T_{ст}$) — температура обратимого равновесного фазового перехода вещества в стеклообразное состояние из переохлажденного расплава при постоянном внешнем давлении.

Интенсивный переход жидкости в пар (*парообразование*) вследствие образования и роста в жидкости пузырьков пара (*пузырьковое кипение*) или пленки пара на поверхности (*пленочное кипение*) называется *кипением* и происходит при определенной *температуре кипения*.

Температура кипения $T_{кип}$ — температура равновесного перехода жидкости в пар при постоянном внешнем давлении. С увеличением внешнего давления и концентрации растворенного вещества она повышается.

Для жидких высокополимерных материалов, в частности для идентификации и оценки свойств масел, смазочных материалов и др., характерными являются *температуры разложения, воспламенения и возгорания*.

Температура разложения — минимальная температура окружающего образец воздуха, при которой из образца в результате разложения выделяется заметное количество газа.

Температура воспламенения — минимальная температура окружающего образец воздуха, при которой выделяется достаточное количество горючих газов, способных воспламениться от внесенного пламени.

Температура возгорания — минимальная температура окружающего образец воздуха, при которой в отсутствие внешнего источника зажигания возникает самовозгорание.

Одной из основных физических характеристик материи, определяющей ее инертные и гравитационные свойства, является *масса*.

Масса вещества рассматривается как мера его количества. Таким образом, для однородной системы масса характеризует число структурных элементов (атомов, ионов, молекул и др.), содержащихся в термодина-

мической системе, и ее строение. Для неоднородных веществ аддитивность массы позволяет ввести понятие «плотность».

Плотность — мера количества вещества в единице объема:

$$\rho = m/V. \quad (2)$$

Плотность, определенная для однородных веществ, может рассматриваться как *теоретическая*. Плотностью, близкой к теоретической, обладают, как правило, металлы, жидкости, некоторые полимеры и др. Для неоднородных веществ используют понятие «*объемная плотность*».

Объемная плотность — величина, определяемая отношением массы неоднородного вещества ко всему занимаемому им объему, включая имеющиеся в нем поры и пустоты. Среднюю объемную плотность $\rho_{\text{ср}}$ вычисляют по формуле:

$$\rho_{\text{ср}} = m/V_e, \quad (3)$$

где V_e — объем вещества в естественном состоянии.

Для инженерных расчетов используются понятия «*относительная плотность*» и «*насыпная плотность*».

Относительная плотность представляет собой отношение плотности вещества ρ к плотности эталонного вещества $\rho_{\text{эт}}$ при определенных внешних условиях:

$$\rho_{\text{от}} = \rho/\rho_{\text{эт}}. \quad (4)$$

Плотность твердых и жидких материалов обычно сравнивают с плотностью воды при температуре 4°C (1000 кг/м³).

Насыпная плотность ρ_n — масса единицы объема свободно насыпанных дисперсных материалов (например, цемента, песка, минеральной ваты и др.).

1.6.2. Физические свойства, характеризующие способность веществ и материалов взаимодействовать с потоками масс и излучений

Физическими свойствами, характеризующими способность практически всех веществ и материалов взаимодействовать с потоками масс (например, воздуха, газа, пара) и излучений (света, звука и др.), являются их *отражательная способность*, *проницаемость* (*проводимость*) и *поглощение*.

Отражение — свойство вещества, заключающееся в воспроизведении особенностей отражаемого объекта или процесса.

Проницаемость (*проводимость*) — явление ослабления потока масс или излучения при прохождении через среду.

Поглощение потока излучения — явление необратимого перехода (превращения) энергии излучения, например энергии звуковой волны, в другие виды энергии.

Рассмотрим некоторые свойства, наиболее распространенные для оценки материалов при взаимодействии с потоками масс, с учетом того, что механические, электрические и магнитные свойства будут представлены далее в самостоятельных подразделах.

Потоки воздуха, газа, пара, воды. Воздухо-, газо-, паро- и водопроницаемости — свойства материала пропускать через свою толщину, соответственно, воздух, газ, пар и воду при наличии перепада давления. Эти слова зависят главным образом от строения и структуры материала. Воздухо- и газопроницаемость выше, если в материале больше сообщающихся пор; наличие воды в порах понижает величину этих свойств.

Количественно воздухо-, газо-, паро- и водопроницаемость характеризуются *коэффициентами*, соответственно, *воздухо-, газо-, паро- и водопроницаемости*. Так, газопроницаемость характеризуется коэффициентом газопроницаемости P ($\text{м}^2/\text{с} \cdot \text{Н}$ или $\text{см}^2/\text{с} \cdot \text{ат}$), т.е. объемом газа, прошедшего за 1 с через единичную площадку, перпендикулярную направлению потока газа при перепаде давления, равном единице.

Неорганические твердые материалы характеризуются малым коэффициентом газопроницаемости ($10^{-18} \dots 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с} \cdot \text{ат}$), стекла и полимерные пленки — более высоким ($10^{-15} \dots 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с} \cdot \text{ат}$), а жидкости — еще большим ($10^{-7} \dots 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с} \cdot \text{ат}$). В твердых материалах наибольший коэффициент газопроницаемости присущ аморфным полимерам (каучукам) с очень гибкими молекулярными цепями, которые легко смещаются, пропуская молекулы диффундирующего газа.

Взаимодействие с водой. В твердых веществах и материалах взаимодействие с водой может основываться на *капиллярных явлениях*, т.е. физических явлениях, обусловленных поверхностным натяжением на границе раздела несмешивающихся фаз.

Гигроскопичность — свойство материала поглощать влагу из окружающей среды (обычно пара воды из воздуха). Материалы, энергично поглощающие молекулы воды, называют *гидрофильными*, а отталкивающие эти молекулы — *гидрофобными*.

Гидрофильность — способность вещества (материала) смачиваться водой. К гидрофильным материалам относятся, например, глины, силикаты.

Гидрофобность — неспособность вещества (материала) смачиваться водой. К гидрофобным материалам относятся, например, многие металлы, жиры, воски, некоторые полимеры.

Водопоглощение (водонасыщение) — свойство материала при непосредственном соприкосновении с водой впитывать и удерживать ее в своих

порах. Оно зависит от наличия в материале открытой пористости и водорастворимых веществ.

Водопоглощение определяют относительно объема или массы материала. Так, водопоглощение по объему W_o — степень заполнения объема материала водой:

$$W_o = (V_b - V_c) / V_e, \quad (5)$$

где V_b и V_c — объемы образцов материала, соответственно, насыщенного водой и в сухом состоянии, см^3 ; V_e — объем вещества в естественном состоянии, см^3 .

Обычно водопоглощение по объему меньше пористости данного материала, так как вода не проникает в очень мелкие поры, а в очень крупных порах не удерживается. Водопоглощение плотных материалов (сталь, стекло, битум) равно нулю. Пористые материалы длительное время не могут находиться в абсолютно сухом или водонасыщенном состоянии, они приобретают определенную влажность, что зависит от температуры и относительной влажности окружающего воздуха.

Поток тепла. Теплопроводность — способность материала передавать через свою толщину тепловой поток, возникающий вследствие разности температур на противоположных поверхностях. Теплопроводность характеризуется коэффициентом теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности (λ) — отношение произведения количества тепла Q , проходящего через пластинку материала, на толщину пластинки h к площади пластинки S , умноженной на разность температур на ее сторонах $(T_1 - T_2)$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$:

$$\lambda = Q h / S (T_1 - T_2). \quad (6)$$

Теплопроводность материала зависит от его строения, структуры, пористости и характера пор, а также от влажности и температуры, при которой происходит передача тепла. Для однородного материала она зависит от плотности (с уменьшением плотности уменьшается теплопроводность).

Теплопроводность характеризует теплофизические свойства материалов, определяя их принадлежность по назначению к *теплоизоляционным, конструкционно-теплоизоляционным и конструкционным материалам*.

Теплопроводность очень важна для конструкционно-теплоизоляционных и теплоизоляционных материалов, используемых в качестве стен и перекрытий отапливаемых зданий, для изоляции холодильников и различных тепловых агрегатов (котлов, теплосетей и т.п.). Теплоизоляционные материалы в свою очередь делятся на классы по теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$: А — *низкой теплопроводности* (до 0,058); Б — *средней* (0,058...0,116) и В — *повышенной* (0,116...0,15).

Поглощение тепла веществами и материалами обычно сопровождается *тепловым расширением*.

Тепловое расширение — способность материала к изменению формы и размеров при его нагревании. Твердые тела расширяются при нагревании во всех направлениях (стержни и проволоки расширяются в основном в длину).

Коэффициент линейного расширения твердых тел α — величина изменения линейного размера материала при изменении температуры на 1°C , $1/\text{K}$:

$$\alpha = \Delta l / (l_1 \Delta T). \quad (7)$$

Коэффициент линейного расширения слабо зависит от температуры.

Объемное расширение твердых тел можно рассматривать как линейное расширение в трех направлениях. Жидкости расширяются во всех направлениях, причем сильнее твердых тел.

Коэффициент объемного расширения жидкости β равен отношению относительного объемного расширения $\Delta V/V_1$ к разности температур ΔT , $1/\text{K}$:

$$\beta = \Delta V/V_1 \Delta T. \quad (8)$$

Исключение среди жидкостей представляет вода, коэффициент объемного расширения которой сильно зависит от температуры, а в интервале $0...4^\circ\text{C}$ принимает отрицательное значение.

Газы расширяются при нагревании значительно сильнее, чем твердые и жидкие тела, причем при повышении температуры произведение давления на объем (pV) также возрастает.

Поток звука. Звукопоглощение — свойство материала поглощать звук. Оно зависит от пористости материала, его толщины, состояния поверхности, а также от частоты звукового тона, измеряемого количеством колебаний в секунду. Звукопоглощение материала оценивается коэффициентом звукопоглощения.

Коэффициент звукопоглощения — отношение количества поглощенной звуковой энергии к общему количеству звуковой энергии, падающей на материал в единицу времени. Звукопоглощающими материалами принято называть такие, коэффициент звукопоглощения которых на средних частотах более 0,2. Коэффициент звукопоглощения зависит от пористости материала.

Звукопроницаемость — способность материала пропускать через свою толщу звуковую энергию. Свойство материала, обратное звукопроницаемости, называется *звукоизоляцией*.

Материалы, применяемые в строительных конструкциях жилых, общественных и производственных зданий для защиты от шума, согласно ГОСТ 4.209—79 подразделяют на *звукопоглощающие* и *звукоизоляционные*.

Звукопоглощающие материалы и изделия подразделяются на:

- *изделия полной заводской готовности с жесткой структурой* (плиты облицовочные на основе минеральной ваты и крахмального связующего, плиты из ячеистых бетонов; листы гипсовые облицовочные, плиты гипсовые листые);
- *изделия полной заводской готовности с полужесткой структурой* (плиты акустические на основе минеральной ваты и синтетического связующего);
- *материалы, применяемые в звукопоглощающих конструкциях в качестве составного элемента.*

Материалы, применяемые в качестве составного элемента в звукопоглощающих конструкциях, подразделяются на:

- *пористые поглотители* (плиты на основе минеральной ваты и синтетического, битумного или крахмального связующих материалов; маты из стеклянного волокна или минеральной ваты прошивные; вата минеральная или стеклянная);
- *защитные перфорированные покрытия* (алюминиевые покрытия, акустические асбоцементные и гипсовые перфорированные плиты);
- *защитные оболочки* (полиэтилентерефталатная пленка, стеклоткань).

Звукоизоляционные прокладочные материалы и изделия подразделяются на:

- *материалы пористо-волокнистые* (плиты на основе минеральной ваты и синтетического, битумного или крахмального связующих материалов; маты из стеклянного волокна или минеральной ваты прошивные; вата минеральная или стеклянная, плиты древесно-волокнистые);
- *материалы пористо-губчатые* (плиты пенополиуретановые, пенополивинилхлоридные и на основе фенолоформальдегидных смол);
- *засыпки* (вспученные перлит и вермикулит, порошок соевитовый и асбестомагнезиальный и др.).

1.6.3. Механические свойства

1.6.3.1. Общие сведения

Механические свойства проявляются как способность материала сопротивляться всем видам внешних механических воздействий.

Механические воздействия характеризуют *по направлению, длительности и области действия*. По направлению механические воздействия можно рассматривать как *линейные* (растяжение и сжатие) и *угловые* (изгиб и кручение). По длительности их разделяют на *статические* и *динамические*, по области действия — на *объемные* и *поверхностные*.

Механические свойства определяют изменение формы, размеров и сплошности веществ и материалов при механических воздействиях, а следовательно, и результат практически любого механического воздействия на вещества и материалы, возникающего при их производстве и эксплуатации (использовании).

К основным механическим свойствам веществ и материалов относятся *упругость, жесткость, эластичность, пластичность, прочность, хрупкость, вязкость и твердость*.

Упругость — свойство материалов самопроизвольно восстанавливать свою форму и объем (твердые вещества) или только объем (жидкости и газы) при прекращении внешних воздействий. Упругость обусловлена взаимодействием между атомами (молекулами) вещества и их тепловым движением.

В качестве меры способности материалов или изделий изменять размеры и форму при заданном типе нагрузки используются понятия «*эластичность*» и «*жесткость*».

Эластичность — способность материала или изделия претерпевать значительные изменения размеров и формы без разрушения при сравнительно небольшой действующей силе.

Жесткость — способность материала или изделия к меньшему изменению размеров и формы при заданном типе нагрузки: чем больше жесткость, тем меньше изменения.

Пластичность — способность твердых материалов сохранять измененными форму и объем без микроскопических нарушений сплошности после снятия механических нагрузок, которые вызвали эти изменения.

Пластическая деформация связана с разрывом некоторых межатомных связей и образованием новых. Пластичность проявляется в деталях конструкций и сооружений, заготовках при обработке давлением (прокатке, штамповке и др.), в пластах земной коры. Пластичность определяет возможность технологических операций обработки материалов давлением. Учет пластичности позволяет определять запасы прочности, деформируемости и устойчивости, расширяет возможности создания конструкций минимального веса.

Механическая прочность твердых веществ — свойство сопротивляться разрушению (разделению на части), а также необратимому изменению формы при механических воздействиях. Прочность твердых веществ обусловлена в конечном счете силами взаимодействия между составляющими их структурными единицами (атомами, ионами и др.).

Хрупкость — свойство твердых веществ разрушаться при механических воздействиях без существенных предварительных изменений формы и объема.

Хрупкость материалов следует рассматривать в связи с условиями их использования. Например, достаточно упругий материал — мрамор, хрупко разрушающийся при растяжении, в условиях несимметричного трехосного сжатия ведет себя как пластичный материал.

Вязкость (внутреннее трение) — способность материалов сопротивляться действию внешних сил, вызывающему:

- в твердых веществах — распространение уже имеющейся острой трещины (разрушение);
- в жидкостях и газах — течение.

Внутреннее трение в твердых телах проявляется как способность необратимо поглощать энергию, полученную телом в результате внешнего воздействия, например превращать в теплоту сообщаемую механическую энергию.

Вязкость жидкостей зависит от химического состава и строения молекул (макромолекул) и возрастает с увеличением молекулярной массы. Возникновение в дисперсных системах или растворах полимеров пространственных структур, образующихся при сцеплении частиц или макромолекул, вызывает резкое повышение вязкости.

Вязкость газов не зависит от их плотности (давления). Для очень разреженных газов понятие вязкости теряет смысл.

Твердость — свойство материалов оказывать сопротивление в поверхностном слое контактному воздействию (вдавливанию или царапанию). Особенность этого свойства заключается в том, что оно реализуется только в небольшом объеме вещества. Твердость — сложное свойство материала, отражающее одновременно его прочность и пластичность.

При оценке механических свойств материалов их различают по группам, характеризующим условия испытаний:

1 — *стандартные механические свойства*, определяемые стандартными испытаниями стандартных (гладких) образцов вне зависимости от конструктивных особенностей и характера службы изделия;

2 — *критерии конструктивной прочности* (работоспособности в условиях эксплуатации) материала, определяемые стандартными испытаниями гладких или с острыми трещинами образцов;

3 — *критерии конструкционной прочности* изделия в целом, определяемые при стендовых, натурных и эксплуатационных испытаниях.

1.6.3.2. Деформации и напряжения

При отсутствии механических воздействий атомы в кристалле находятся в равновесных положениях. При механических воздействиях происходит деформация материального объекта.

Деформация — изменение взаимного расположения множества частиц вещества, которое приводит к изменению формы и размеров тела или его частей и вызывает изменение сил взаимодействия между ними. Деформируемыми являются все вещества.

Если приложить сжимающую нагрузку, то частицы строения вещества (например, атомы) будут сближаться до такого расстояния, при котором внутренние отталкивающие силы уравновесят внешние сжимающие силы. При растяжении расстояние между структурными частицами увеличивается до тех пор, пока силы притяжения не уравновесят внешнюю нагрузку.

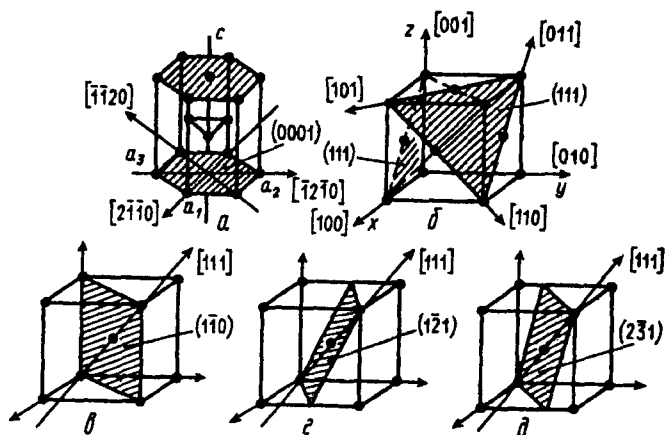


Рис. 25. Системы скольжения в кристаллических решетках:
 а — ГПУ; б — ГЦК; в, г, д — ОЦК

В твердых веществах по механизму протекания различают упругую и пластическую деформации. *Упругой деформацией* называют деформацию, влияние которой на форму, структуру и свойства материала устраняется после прекращения действия внешних сил, а *пластической* — такую часть деформации, которая остается после снятия нагрузки, необратимо изменяя структуру материала и его свойства.

Все реальные твердые вещества даже при малых деформациях обладают пластическими свойствами, что предопределяет смешанные механизмы протекания деформации — *упругопластическую деформацию*. Так, в различных деталях и конструкциях пластические деформации охватывают, как правило, небольшой объем материала, остальной — испытывает только упругие деформации. Если величина деформации явно зависит от времени, например возрастает при неизменной нагрузке, но обратима, она называется *вязкоупругой*.

Пластическая деформация в твердых веществах может осуществляться, например, скольжением, которое протекает в кристаллической решетке вещества по плоскостям и направлениям с наиболее плотной упаковкой атомов. Плоскости скольжения и направления скольжения, лежащие в этих плоскостях, образуют *систему скольжения*. В металлах, например, могут действовать одна или одновременно несколько систем скольжения (рис. 25). Так, кубическая кристаллическая решетка определяет более высокие пластические свойства, поскольку скольжение в ней происходит равновероятно во многих направлениях. Металлы с такой решеткой легче всего поддаются прокатке, штамповке и другим видам механических воздействий.

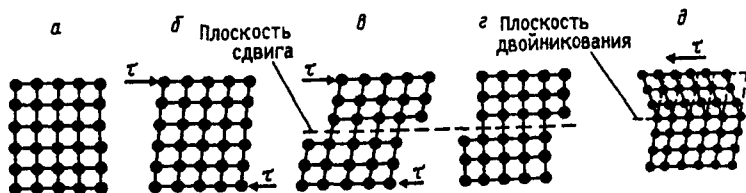


Рис. 26. Схемы упругой и пластической деформаций в монокристалле под действием сдвига:

а — первоначальный кристалл; б — упругая деформация; в — увеличение упругой и появление пластической деформации, вызванной скольжением при нагружении τ больше предела упругости; г, д — механическое воздействие, обуславливающее появление сдвига

Представление процесса скольжения как одновременного передвижения одной части кристалла относительно другой является чисто схематическим (рис. 26, а—г), так как такое передвижение потребовало бы величин внешней нагрузки, в сотни и тысячи раз превышающих те, при которых процесс протекает в действительности. В реальных материалах скольжение осуществляется как в результате перемещения дислокаций в одной плоскости скольжения, так и путем перехода на другие. Дислокации, движущиеся в деформированном кристаллическом веществе, порождают большое число дислоцированных атомов и вакансий.

Большая часть работы (до 95%), затрачиваемой на деформацию, превращается в теплоту (происходит нагрев), остальная часть энергии аккумулируется в виде повышенной плотности дефектов решетки (вакансий и главным образом дислокаций). О накоплении энергии свидетельствует также рост остаточных напряжений в результате деформации. В связи с этим состояние пластически деформированного материала неустойчиво и может изменяться, например при термической обработке.

Пластическая деформация некоторых металлов, имеющих плотно упакованные кубические или гексагональные решетки, кроме скольжения может осуществляться *двойникованием* (рис. 25, д), которое сводится к переориентации части кристалла в положение, симметричное по отношению к части, не изменившей ориентацию относительно плоскости, называемой *плоскостью двойникования*.

Простейшими элементами деформаций являются:

- *относительное удлинение δ* — отношение приращения длины ($l_1 - l_0$) образца под действием нагрузки к ее первоначальной величине l_0 :

$$\delta = (l_1 - l_0) / l_0; \quad (9)$$

- *относительное сужение ψ* — отношение уменьшения площади поперечного сечения образца под действием нагрузки ($S_0 - S_1$) к ее первоначальной величине S_0 :

$$\psi = (S_0 - S_1) / S_0. \quad (10)$$

Сопротивление деформированию определяется сопротивлением сдвигу одного атомного слоя относительно другого, соседнего. Для оценки величины этого сопротивления введено понятие «*напряжение*».

Напряжение — мера внутренних сил, возникающих при деформации материала, характеризующая изменение сил взаимодействия между частицами вещества при его деформации. Напряжение не измеряется непосредственно, а лишь вычисляется через величины действующих на тело сил или определяется косвенно — по эффектам его действия, например по пьезоэлектрическому эффекту.

Напряжение является векторной величиной; величины проекции этого вектора на нормаль и касательную плоскость называются *нормальным* и *касательным напряжениями*.

Система скольжения при пластической деформации в конкретном кристаллическом веществе характеризуется величиной минимального касательного напряжения, которое необходимо для начала скольжения. Это *критическое напряжение сдвига* τ_0 , которое не зависит от ориентации плоскости скольжения по отношению к приложенной нагрузке и является одной из фундаментальных характеристик кристаллического материала.

Если скольжение в данной системе начинается при достижении напряжения сдвига критической величины τ_0 , то продолжение деформации требует непрерывного повышения величины напряжения сдвига, т.е. деформация сопровождается непрерывным упрочнением (*деформационное упрочнение*, или *наклеп*).

Наклеп — изменение структуры и свойств с увеличением плотности дефектов кристаллической решетки в веществах в результате пластической деформации. При наклепе уменьшаются пластичность и ударная вязкость, но повышаются твердость и прочность. Наклеп используется для поверхностного упрочнения изделий, но следует иметь в виду, что наклепанные металлы больше подвержены коррозии и склонны к коррозионному растрескиванию.

Напряжения характеризуют *по источнику возникновения* и *по отношению ко времени воздействия*.

По источнику возникновения напряжения делят на *механические* — при механических воздействиях, *термические* — вследствие температурного градиента, например в процессе быстрого нагрева или охлаждения между поверхностными и внутренними слоями, и *структурные (фазовые)* — при различных физико-химических процессах, происходящих в веществе, например изменении объема отдельных кристаллитов при фазовых превращениях.

Величина механических напряжений в образце материала σ прямо пропорциональна величине внешней силы F , Па:

$$\sigma = F/S, \quad (11)$$

где S — площадь образца, м.

Механическое напряжение называется *условным*, если при его вычислении сила относится к площади сечения в недеформированном состоянии, и *истинным*, если учтено изменение площади при деформировании.

По отношению ко времени воздействия напряжения рассматривают как *временные* и *остаточные*. Временные напряжения обусловлены действием внешней нагрузки и исчезают после ее снятия. Остаточные напряжения возникают и уравниваются в объекте после снятия внешней нагрузки.

1.6.3.3. Разрушение кристаллических веществ

В случае приложения внешней силы может произойти *разрушение* кристаллического вещества путем отрыва одной части кристалла от другой.

Разрушение — процесс зарождения и развития (или только развития) трещин в кристаллическом веществе, приводящий к его разделению на части. Поверхность, образуемая в результате разрушения, называется *изломом*.

Источником разрушения является *зародышевая трещина* (рис. 27). Механизм зарождения зародышевых трещин — разрыв межатомных связей и скопление дислокаций перед препятствием (границы зерна, межфазные границы и др.).

Механизм разрушения, как правило, реализуется двумя путями:

- 1) слиянием трещин в одну магистральную;
- 2) развитием отдельных трещин за счет движения к ним вакансий.

Разрушение в одном и том же материале по своему характеру может быть *хрупким*, *вязким* и *смешанным*. Это определяется как строением и структурой самого материала, так и условиями воздействий. Понижение температуры, например, обуславливает переход от вязкого разрушения к хрупкому. Это явление получило название *хладноломкость*. Увеличение скорости деформирования также ведет к хрупкому разрушению.

При хрупком разрушении вершина зародышевой трещины сохраняет остроту, соизмеримую с атомными размерами, а трещина растет самопроизвольно, если ее длина (при заданном напряжении) превышает некоторое критическое значение. Вершина

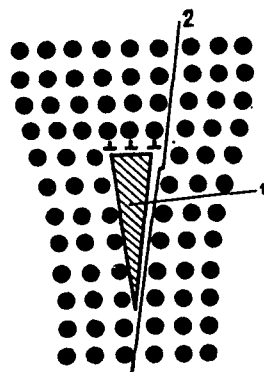


Рис. 27. Схема образования зародышевой трещины:

1 — зародышевая трещина; 2 — граница зерна

такой трещины при ее распространении будет окаймлена узкой зоной пластической деформации, на создание которой затрачивается дополнительная энергия.

При вязком разрушении зародышевая трещина затупляется у своей вершины и величина зоны пластической деформации, идущей перед распространяющейся трещиной, велика, причем для роста трещины необходим подвод энергии извне.

При вязком разрушении скорость распространения трещин менее 100 м/с, а внешний вид излома — гладкий. При хрупком разрушении скорость распространения трещин превышает 1000 м/с (для стали — 2500 м/с), а внешний вид излома — кристаллический.

Работу, затраченную на разрушение образца, делят на работу зарождения и на работу распространения трещины. Интегральной характеристикой, учитывающей работу зарождения трещины и работу распространения трещины, является *ударная вязкость*.

Ударная вязкость — способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки. Обычно оценивается работой до разрушения надрезанного образца при ударном изгибе, отнесенной к площади его сечения в месте надреза. Измеряется в Дж/м² (кгс · м/см²). Вязкому разрушению соответствуют обычно большие значения поглощенной энергии, т.е. большая работа распространения трещин. При хрупком разрушении работа распространения трещины пренебрежимо мала, а при смешанном она возрастает пропорционально проценту вязкой (или волокнистой) составляющей в изломе.

Микроструктуры при разрушении изучают по внешнему виду излома. При этом выделяют *транскристаллитное* (по телу зерна) и *интеркристаллитное* (межзеренное) разрушения поликристаллических веществ. Например, при распространении трещины по телу зерна может происходить как вязкое, так и хрупкое разрушения. Межзеренное разрушение наблюдается во всех случаях разрушения поликристаллических веществ, но больше проявляется при их хрупком разрушении, и само является всегда хрупким. Межзеренное разрушение облегчается при выделении по границам зерен частиц хрупкой фазы.

Разрушение полимерных материалов обусловлено процессом разрыва внутримолекулярных химических связей. В некоторых полимерах единичный акт разрыва одной химической связи в макромолекуле служит источником для возбуждения вторичных процессов с выделением внутренней энергии и добавочным разрушением связей за счет этой энергии.

Если в однородных материалах трещины развиваются в глубь тела, то в слоистых композитах — в межслойной области. Прочность матричного слоя обычно сравнительно низка, а возникающие в них напряжения велики.

Это приводит к тому, что имеющиеся в слоистых композитах дефекты (поры, включения, разрывы слоев и др.) приводят к развитию в них трещин в межслойной области, особенно при циклических нагрузках (усталостное расслоение); при этом скорость распространения трещин непрерывно увеличивается по мере роста числа циклов нагружения.

1.6.3.4. Основные механические характеристики

Испытание на одноосное растяжение (ГОСТ 1497—84) является основным источником информации о механических характеристиках материалов. Эти испытания ведутся с автоматической записью результатов, которая интерпретируется как *диаграмма деформации*.

Диаграмма деформации — графическая характеристика механических свойств материала, построенная на основании результатов испытаний в координатах «напряжение σ — относительная деформация ϵ ». Вид диаграмм деформации, полученных таким образом, позволяет однозначно судить о механических свойствах различных материалов (рис. 28).

Основные механические характеристики сопротивления материала деформации и разрушению: *модуль Юнга, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, предел пропорциональности, предел упругости, а также пределы текучести и прочности* — рассчитывают по определенным точкам на диаграмме деформации, например по диаграмме растяжения металлов для условных (1) и истинных (2) напряжений (рис. 29).

Модуль Юнга (модуль продольной упругости), согласно закону Гука, равен отношению величин приложенного напряжения к вызванной им относительной деформации (только в области упругих деформаций):

$$E = \sigma / \epsilon. \quad (12)$$

Он определяет *жесткость* материала и характеризует сопротивляемость материала упругой деформации. Из механических характеристик это един-

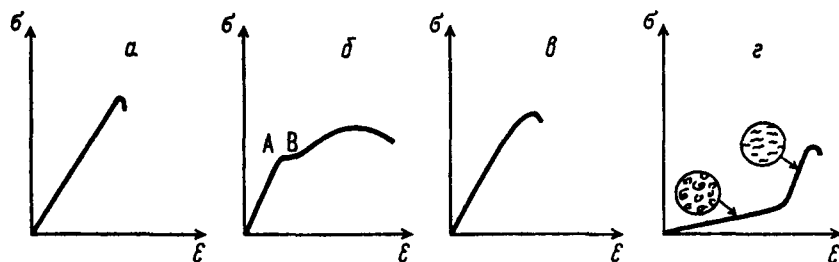


Рис. 28. Вид диаграмм деформации на растяжение различных материалов: а — упругих (стекло); б — пластичных (поликристаллические вещества); в — хрупких (бетон); г — эластичных (резина)

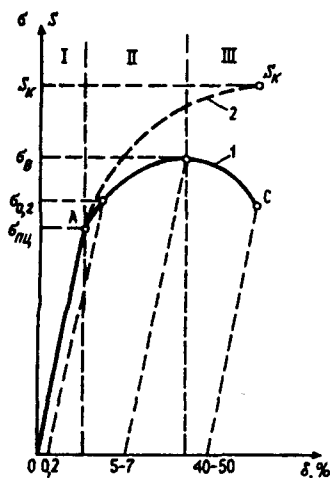


Рис. 29. Диаграмма растяжения металлов для условных (1) и истинных (2) напряжений:

I — область упругой деформации; II — область пластической деформации; III — область развития трещин

ственная, практически не зависящая от структуры материала. Величина модуля Юнга определяется только межатомной связью и имеет корреляцию с температурой плавления (например, для металлов с кубической решеткой). Жесткость конструкции тем выше, чем больше модуль упругости.

Коэффициент Пуассона μ — относительное изменение поперечного размера тела $\Delta d/d$, деленное на относительное изменение его длины:

$$\Delta d/d = -\mu \Delta l/l. \quad (13)$$

Величина коэффициента Пуассона для всех материалов находится в пределах 0,2...0,5. Для большинства металлов $\mu \sim 0,3$. Значение $\mu = 0,5$ соответствует механически несжимаемому материалу.

Модуль сдвига (G) — характеристика сдвига параллельных кристаллографических плоскостей тела, которая по аналогии с законом Гука может описываться как отношение касательного напряжения τ в поперечном сечении к деформации сдвига. Модуль сдвига может быть определен по известным значениям модуля Юнга и коэффициента Пуассона, Н/м²:

$$G = E/2 (1 + \mu). \quad (14)$$

Модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига называют совместно **модулями упругости** (*упругими постоянными*), т.е. величинами, характеризующими упругие свойства материалов при малых деформациях.

Предел пропорциональности (условный) ($\sigma_{пл}$) — величина напряжения, при котором отступление от линейной зависимости на диаграмме деформации достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной в этой точке к кривой деформации, увеличивается на 50% своего значения на линейном участке. Величина $\sigma_{пл}$ в инженерных расчетах указывает напряжение, до которого конструкция может работать без остаточных напряжений.

Предел упругости ($\sigma_{0,05}$) — величина напряжения, при котором остаточная деформация не превышает 0,05% первоначальной длины образца. Технический смысл предела упругости состоит в том, что он характеризует предельное напряжение, которое допустимо при работе упругих элементов. Допуск на остаточную деформацию может быть еще более жестким, например

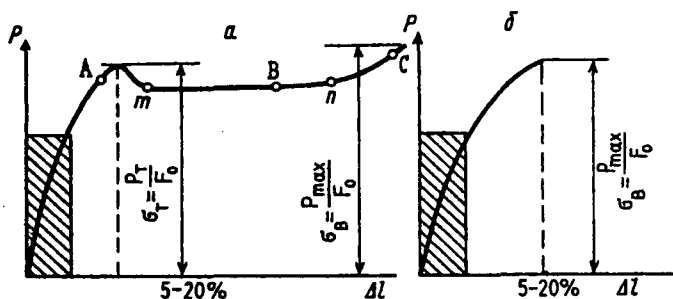


Рис. 30. Диаграмма растяжения пластмасс:

а — вязкие аморфные и кристаллические термопласты; *А, В, С* — точки разрушения полимеров с различными относительными молекулярными массами ($M_A < M_B < M_C$); *б* — хрупкие термопласты и реактопласты; вязкие термопласты с ориентированной структурой по направлению воздействия; заштрихованная область — допустимые нагрузки и удлинения

0,005% (предел упругости 0,005). Пределы пропорциональности и упругости очень близки и практически могут совпадать.

Предел текучести (физический) (σ_T) — наименьшее напряжение, при котором начинает развиваться пластическая деформация и образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки.

При текучести процесс деформации с увеличением его продолжительности может протекать с небольшой скоростью или, наоборот, очень быстро, вплоть до разрушения. Если процесс развивается очень быстро, то, как правило, на диаграмме деформации наблюдается *площадка текучести* — горизонтальный участок (см. рис. 28, б; рис. 30, а — участок АВ). Если протяженность площадки текучести велика, то материал называют идеально пластическим (неупрочняющимся). Для некоторых таких материалов на диаграмме деформации обнаруживается так называемый *зуб текучести*, т.е. резкое снижение напряжения перед появлением пластической деформации (рис. 30, а).

Если площадки текучести на диаграмме деформации нет (см. рис. 28) и точно указать напряжение, при котором впервые возникают пластические деформации, невозможно, то для таких материалов вводится *условный предел текучести* как напряжения, при разгрузке от которого в образце впервые обнаруживается остаточная (пластическая) деформация величины Δ . Например, предел текучести, измеренный с допуском $\Delta = 0,2\%$, обозначается $\sigma_{0,2}$.

Предел текучести (условный) ($\sigma_{0,2}$) — величина напряжения, при котором остаточное относительное удлинение достигает 0,2%. Величина условного предела текучести при нормальной температуре используется для разделения материалов по прочности на три класса: низкой, средней и высокой прочности.

Предел прочности (временное сопротивление) (σ_B) — величина напряжения, соответствующего наибольшей нагрузке, приводящей к разрушению

образца. Значение предела прочности, вообще говоря, зависит от характера и параметров деформации, а также от температуры, давления, наличия химически агрессивной среды. Однако для практики важно, что существует почти постоянное предельное значение напряжения σ_b , выше которого образец разрушается практически мгновенно.

Характеристики материалов $\sigma_{0,2}$, σ_b , E , а также δ , ψ являются базовыми — они включены в государственные стандарты на поставку конструкционных материалов, паспорта приемочных испытаний, а также в расчеты прочности и ресурса.

Величина механических характеристик существенно зависит от таких внешних и внутренних факторов, как химический состав материала, вид предшествующих воздействий (например, деформация), состояние поверхности, температура и наличие химически агрессивной среды и др. Так, при повышении температуры прочностные характеристики сильно снижаются и предел текучести при температуре плавления стремится к нулю; чем ниже температура плавления сплава, тем при более низких температурах наступает резкое падение прочности. Понижение температуры обуславливает переход от вязкого разрушения к хрупкому (критическая температура — *порог хладноломкости*).

1.6.4. Электрические свойства

Общие сведения. **Электрические свойства** — совокупность свойств, характеризующих способность веществ и материалов проводить электрический ток в электрическом поле. К электрическим свойствам, наиболее широко используемым для исследования материалов (особенно металлических) и оценки возможности их практического применения, в первую очередь относится *удельная электропроводность* (γ) и обратная ей величина — *удельное электрическое сопротивление* (ρ), а также *температурный коэффициент удельного электросопротивления* (α_{ρ_0}).

Электропроводность (электрическая проводимость) — способность материала пропускать электрический ток под воздействием электрического поля, а также физическая величина, количественно характеризующая эту способность.

Электропроводность определяется наличием подвижных носителей заряда. Механизмы переноса заряда при различных агрегатных состояниях вещества сильно различаются. Однако величина переносимого заряда всегда равна целому числу элементарных электрических зарядов.

Электрическое сопротивление (электросопротивление) — свойство материала, определяющее силу его противодействия электрическому току при заданном напряжении электрического поля.

Удельное электрическое сопротивление (ρ_0) — характеристика, применяемая для оценки электросопротивления, Ом · м:

$$\rho_0 = R S / l, \quad (15)$$

где S и l — соответственно, электрическое сопротивление, площадь и длина проводника электрического тока.

Температурный коэффициент удельного электросопротивления (α_{ρ_0}) — относительное изменение удельного электрического сопротивления (ρ_0), деленное на величину изменения температуры ΔT , $1/K^{-1}$:

$$\alpha_{\rho_0} = \frac{\Delta \rho_0}{\rho} / \Delta T. \quad (16)$$

Все материалы, применяемые в технике, по своим электрическим свойствам делят на три группы: **проводники**, **полупроводники** и **диэлектрики**. Различаются эти материалы по величине электросопротивления, характеру его температурного изменения и типу проводимости. Резкой границы между диэлектриками и полупроводниками провести нельзя. По величине удельного электросопротивления принято следующее деление:

проводники — $10^{-5} \dots 10^{-8}$ Ом · м и менее;

полупроводники — $10^{-6} \dots 10^7$ Ом · м;

диэлектрики — $10^7 \dots 10^{18}$ Ом · м.

Электрическое сопротивление у диэлектриков и полупроводников с повышением температуры уменьшается, а у проводников растет. У некоторых металлов при внешних воздействиях (например, уменьшении температуры) сопротивление скачком уменьшается практически до нуля (явление **сверхпроводимости**).

Характер изменения электрических свойств различных материалов при внешних воздействиях можно объяснить, если рассмотреть, что является в них носителем зарядов.

Проводники по типу носителей зарядов делятся на электронные (металлы и сплавы), ионные (электролиты) и смешанные, где имеет место движение как свободных электронов, так и ионов (например, плазма). Чистые металлы обладают малым удельным электросопротивлением ($\rho_0 = 0,0150 \dots 0,105$ мкОм · м). Исключением является ртуть, у которой удельное электросопротивление составляет $0,943 \dots 0,952$ мкОм · м. Сплавы имеют более высокие значения удельного электросопротивления ($\rho_0 = 0,30 \dots 1,8$ мкОм · м). К группе сплавов с повышенным удельным электросопротивлением относятся жаро- и коррозионностойкие сплавы, которые применяются в электронагревательных приборах и реостатах.

Для полупроводников носителями зарядов являются электроны проводимости (электронная проводимость n -типа) и дырки (дырочная проводимость p -типа). **Электронами проводимости** являются электроны, способные перемещаться по кристаллу. **Дырка** — электронная вакансия в кристалле полупроводника, обладающая подвижностью. Дырки — положительно заряженный носитель тока в полупроводнике.

В чистом полупроводнике, проводимость которого обусловлена тепловым возбуждением, одинаковое число электронов и дырок движется в противоположных направлениях (**собственная проводимость**). Собственная проводимость возрастает при повышении температуры.

Электроны проводимости в полупроводниковых материалах могут образоваться под действием света (*внутренний фотоэффект*). При достаточно большой энергии светового потока проводимость полупроводниковых материалов возрастает. Техническое применение: *фотосопротивления*.

Проводимость полупроводника можно увеличить добавлением атомов других элементов (легированием), в результате возникает *примесная проводимость*. Примесная проводимость может быть обусловлена электронами или дырками. При этом в одном и том же образце полупроводникового материала один участок может обладать *p*-проводимостью, а другой — *n*-проводимостью. *p—n-переход* работает как выпрямитель, пропуская ток только из *p*-области в *n*-область. Полупроводниковый материал с *p—n-переходом* называется *диодом* и используется для выпрямления переменного тока.

Твердые диэлектрические материалы (полимеры, керамика, неорганическое стекло и др.) делят на *неполярные* и *полярные диэлектрики*.

Неполярные диэлектрики могут иметь молекулярное (полиэтилен, фторопласт-4 и др.) или ионное кристаллическое (слюда, кварц и др.) строение. Молекулярные диэлектрики состоят из электрически нейтральных молекул, которые до воздействия на них электрического поля не обладают электрическими свойствами. Ионные кристаллические диэлектрики образованы парами ионов, причем каждая пара составляет нейтральную частицу. Ионы располагаются в узлах кристаллической решетки.

Полярные диэлектрики (например, поливинилхлорид) состоят из полярных молекул — *диполей*. Электрические диполи представляют собой пары зарядов противоположных знаков, которые взаимно уравниваются и находятся на некотором расстоянии друг от друга. Величина диполя характеризуется дипольным моментом — произведением величины заряда на расстояние между ними. Диполи обладают начальным электрическим моментом вследствие асимметрии своего строения еще до воздействия на них электрического поля. В общем случае в полярных диэлектриках диполи имеют достаточную величину, но располагаются беспорядочно, и их присутствие не отражается на электрических свойствах.

Основные характеристики диэлектрических материалов. Для диэлектрических материалов наибольшее практическое значение среди электрических свойств и характеристик имеют *поляризация, диэлектрические потери, пробой и электрическая прочность*.

Поляризация — это процесс упорядочения (смещения и деформации) электронных оболочек связанных электрических зарядов вещества под действием приложенного электрического поля.

Механизмы поляризации веществ различны и зависят от характера химической связи (рис. 31). Например, в ионных кристаллах (NaCl и др.) поляризация является результатом деформации электронных оболочек отдельных ионов (электронная поляризация) и сдвига ионов относительно друг друга (ионная поляризация). В кристаллах с ковалентной связью (например, в алмазе) поляризация обусловлена главным образом смещением электронов, осуществляющих химическую связь. В полярных диэлектриках (например, в твердом H_2S), в которых молекулы или радикалы представляют собой

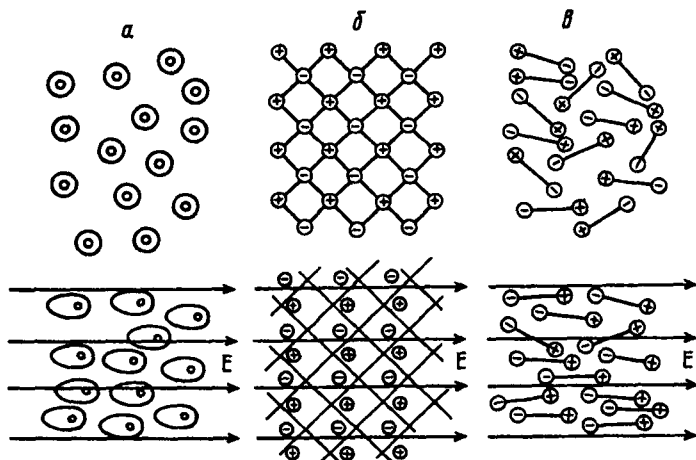


Рис. 31. Схемы электронной (а), ионной (б) и дипольно-релаксационной (в) поляризации

электрические диполи, поляризация вызывается их преимущественной ориентацией (ориентационная поляризация). Такая ориентационная поляризация типична для жидкостей и газов. Сходный механизм поляризации часто наблюдается в веществах с водородной связью (например, у льда), где ионы водорода имеют несколько положений равновесия. В таких веществах поляризация происходит «перескоком» под действием электрического поля отдельных ионов из одних положений равновесия в другие.

В кристаллических диэлектриках, где ионы разного знака расположены упорядоченно, поляризация может существовать и в отсутствие электрического поля, например при деформации — **пьезоэлектрики**, при повышении температуры — **пироэлектрики**. Разновидностью пироэлектриков являются **сегнетоэлектрики** (титанат бария, сегнетова соль и др.), в которых поляризация может существенно изменяться как по величине, так и по знаку, например при понижении температуры.

В основе пьезоэффекта лежит смещение ионов в кристаллической решетке при упругой деформации. Пьезоэффект анизотропен и характеризуется **пьезомодулем** — зарядом, который появляется на поверхности пластин пьезоэлектрика под действием единичной силы. От пьезоэлектриков требуются высокие значения пьезомодуля и малые потери.

Диэлектрическая проницаемость — величина, показывающая во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в среде меньше, чем в вакууме.

Диэлектрическую проницаемость определяют с помощью конденсаторов. В зависимости от конденсатора (с воздухом или вакуумом), выбранного для сравнения, различают относительную (ϵ_0) и абсолютную (ϵ_a) диэлектрические проницаемости.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м:

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon, \quad (17)$$

где $\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Наименьшую диэлектрическую проницаемость имеет вакуум ($\epsilon_0 = 1$), диэлектрическая проницаемость воздуха 1,00058, жидких и твердых диэлектриков — 2...17, а сегнетоэлектриков — 1500...7500.

На величину диэлектрической проницаемости оказывают влияние изменение температуры (с увеличением температуры ее величина понижается) и частота приложенного к диэлектрику напряжения.

Диэлектрические потери — часть энергии (мощности) электрического переменного поля, которая при переполяризации превращается в диэлектрике в теплоту и нагревает его.

Количественно они характеризуются величиной *тангенса угла диэлектрических потерь* $\operatorname{tg} \delta$ (угол δ — разность фаз между векторами поляризации электрических зарядов и напряженности электрического поля). У твердых диэлектриков величины диэлектрических потерь находятся в пределах $2...5 \cdot 10^{-3}$. Наименьшими значениями диэлектрических потерь обладают неионизированные газы, которые все являются диэлектриками.

Диэлектрические потери диэлектрика, включенного под постоянное напряжение, значительно меньше. При этом неравенство потерь энергии при действии постоянного или переменного напряжений наблюдается только в диэлектриках. Особенно значительные потери мощности могут возникать при больших нагреве диэлектрика и его преждевременном разрушении.

Разрушение твердых диэлектриков под действием электрического тока может быть двух видов: пробой толщи материала и разряд по его поверхности. Наибольшие разрушения вызывает *пробой*.

Пробой — резкое возрастание электропроводности вещества в электрическом поле, напряженность которого превышает определенное значение. Пробой проходит в три стадии: формирование разряда, завершение разряда и послепробойная стадия. При пробое протекание тока происходит по узкому каналу и сопровождается, как правило, необратимыми разрушениями вещества: образуется сквозное отверстие или проплавляется канал. Наличие в материале пор, воздушных и газовых включений создает благоприятные условия для пробоя, так как в них возникают дополнительные микроразряды.

Различают *пробой тепловой*, происходящий при существенном тепловом воздействии на материал, и чисто *электрический*, вызванный увеличением напряжения внешнего поля до критического значения (*электрической прочности*).

Электрическая прочность — величина критического напряжения однородного электрического поля при пробое, позволяющая оценить способность материала противостоять его разрушению электрическим напряжением.

Числовые значения электрической прочности твердых диэлектриков очень большие (несколько миллионов вольт на 1 м толщины материала). Электрическая прочность чистых однородных жидких диэлектриков по величине близка электрической прочности твердых диэлектриков, но наличие примесей и загрязнений существенно ее понижают. У слюды, кварца и других хороших диэлектриков электрическая прочность порядка $10^8...10^9$ В/м; в очищенных жидких диэлектриках — около 10^8 В/м; для воздуха при нор-

мальных условиях и толщине слоя более 0,01 м — до $3 \cdot 10^6$ В/м. У полупроводников электрическая прочность изменяется от 10^8 до 10^{-3} В/м.

Разрушение по поверхности твердого диэлектрика от электрического разряда в виде электрической дуги начинается и происходит в газе над его поверхностью. Под влиянием дуговых разрядов и искрения происходит прогрессирующее поверхностное эрозионное разрушение в виде токопроводящего следа или токопроводящей дорожки, имеющих древовидную форму. И дуга, и токопроводящий слой вызывают высокотемпературные реакции разложения и горения диэлектрика.

Диэлектрики используются главным образом как электроизоляционные материалы. Пьезоэлектрики применяются для преобразования звуковых колебаний в электрические и наоборот; пирозэлектрики — для индикации и измерения интенсивности инфракрасного излучения; сегнетоэлектрики — как нелинейные элементы в радиоэлектронике. Из жидких диэлектриков наибольшее применение имеют минеральные масла (в трансформаторах, конденсаторах и т.д.).

Требования к электроизоляционным материалам рудничного оборудования (ГОСТ Р 51330.20—99). Рудничное электрооборудование может иметь два уровня изоляции — 1 или 2.

Рудничное электрооборудование с изоляцией уровня 1 должно быть рассчитано для работы при относительной влажности окружающей среды $(98 \pm 2)\%$ (с конденсацией влаги) при температуре $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$. Электрооборудование с изоляцией уровня 2 должно быть рассчитано для работы при относительной влажности окружающей среды $(98 \pm 2)\%$ при температуре $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Электрооборудование, предназначенное для работы в угольных шахтах, должно иметь уровень изоляции 1.

Электроизоляционные материалы, применяемые для изготовления деталей рудничного оборудования, классифицируются по *сравнительному индексу трекинговостойкости* (СИТ) на группы а, ..., г.

Трекинг — последовательное образование токопроводящих мостиков, которые формируются на поверхности твердого электроизоляционного материала вследствие совместного действия электрического напряжения и наличия загрязнений на его поверхности. Количественно трекинг характеризуется *сравнительным индексом трекинговостойкости* и *контрольным индексом трекинговостойкости*.

Сравнительный индекс трекинговостойкости — числовое значение максимального напряжения в вольтах, при котором материал выдерживает воздействие 50 капель электролита без образования трекинга.

Контрольный индекс трекинга — числовое значение контрольного напряжения в вольтах, при котором материал выдерживает 50 капель электролита без образования трекинга.

В табл. 2 приведена примерная классификация электроизоляционных материалов по группам трекинговостойкости.

Таблица 2

Примерная классификация электроизоляционных материалов по трекинговостойкости

Группа материала	Наименование, марка материала
<i>а</i>	Электрокерамика (фарфор, стеатит, кордиерит); слюда и слюдяные материалы без органических связующих; электроизоляционные стекла (ситаллы, микалекс)
<i>б</i>	Аминопласты марок МФВ1, МФВ3 (К-78-51), МФЕ1 (ДО-2); пресс-материалы на основе кремнийорганических смол ПКО-1-1-1 (КФ-9), ПКО-1-1-3 (КФ-10), ПКО-1-2-4 (КМС-9), ПКО-1-3-5 (КПЖ-9), ПКО-1-3-11 (КМК-218) и др.; асбоцемент, асботекстолит; стекло-текстолиты СКМ-9, СТКМ; фторопласт-4; компанор М-5 ЭШ; пресс-материалы на основе полиэфирной смолы ПСК-5РМ
<i>в</i>	Пресс-материалы на основе полиэфирных смол (премиксы) ПСК-5, ПСК-5Н, ПСК-ОРМТ, ПСК-ОРВМТ, лавсановый гетинакс ЛГ-20
<i>г</i>	Премиксы ПСК-5Т, ПСК-5НТ; полиамид 610, полистирол листовой АБС-2020, паронит ПОН

Для рудничного электрооборудования и электрооборудования угольных шахт не допускается применение гигроскопических диэлектриков, имеющих влагопоглощение за 24 ч более 2% (например, шифер, мрамор, древесина и т.п.). Электроизоляционные материалы для деталей рудничного и шахтного оборудования должны обладать:

- функциональными свойствами, например прочностью и твердостью, гарантирующими их работоспособность;
- ударной вязкостью, кДж/м², не менее, для материалов:
 - керамических — 3;
 - пластических масс, слоистых пластиков, литых смол и компаундов — 4;
 - изоляционных для изготовления электрических соединителей — 7;
- теплостойкостью — не менее чем на 20°С выше их наибольшей рабочей температуры.

Изоляционные части, изготовленные из пластмассы или пластин, в которых полностью или частично удален поверхностный слой, должны покрываться изоляционным лаком, имеющим значение СИТ не ниже, чем первоначальный слой.

1.6.5. Магнитные свойства

Общие сведения. Магнитное состояние веществ определяет *магнетизм*.

Магнетизм — особая форма взаимодействия, осуществляемого магнитным полем, между движущимися электрически заряженными частицами (телами) или частицами (телами) с *магнитным моментом*.

Магнитный момент M — векторная величина, характеризующая вещество как источник магнитного поля. Полный магнитный момент свободного атома равен геометрической сумме орбитальных и спиновых моментов всех его электронов. Упорядоченно ориентированные магнитные моменты атомов вещества создают макроскопический магнитный момент.

Характеристикой магнитного состояния вещества является *намагниченность* J , которая определяется как отношение магнитного момента M вещества к его объему V . При этом достижение максимально возможного для данного вещества значения намагниченности $J_{\text{беск}}$ называется *магнитным насыщением*.

Совокупность атомов с упорядоченно ориентированными магнитными моментами может образовать самостоятельный элемент структуры вещества — *домен*.

Домен — элемент субструктуры химически однородного вещества, характеризующийся спонтанной (самопроизвольной) намагниченностью. Обычно домены имеют размеры $\sim 10^{-5} \dots 10^{-2}$ см и доступны непосредственному наблюдению.

Вещества в соответствии со схемами ориентации магнитных моментов их атомов классифицируются по магнитному состоянию на *парамагнетики*, *ферромагнетики*, *антиферромагнетики* и *ферримагнетики* (рис. 32).

У *парамагнетиков* магнитные моменты атомов внутри каждого домена ориентированы хаотично и взаимно компенсируют друг друга, поэтому материал в целом не намагничен. Парамагнетиками являются все переходные металлы с недостроенными f - и d -электронными оболочками; щелочные и щелочно-земельные металлы, ряд солей Fe, Co, Ni и редкоземельных элементов; водные растворы солей, содержащих ионы переходных элементов; из газов — кислород O_2 .

У *ферромагнетиков* внутри каждого домена магнитные моменты атомов расположены параллельно друг другу в одном направлении, поэтому каждый домен спонтанно намагничен до величины магнитного насыщения. Вектора намагниченности доменов ферромагнетиков в отсутствие внешнего магнитного поля ориентированы таким образом, что результирующая намагниченность образца в целом, как правило, равна нулю.

Ферромагнетизм проявляется в кристаллах Fe, Co, Ni, ряде редкоземельных металлов (Gd, Dy, Er и др.), в сплавах и соединениях с участием этих элементов, а также в сплавах Cr, Mn и соединениях U. Особую группу ферромагнетиков образуют сильно разбавленные растворы замещения парамагнитных атомов (например, Fe или Co) в диамагнитной матрице Pd.

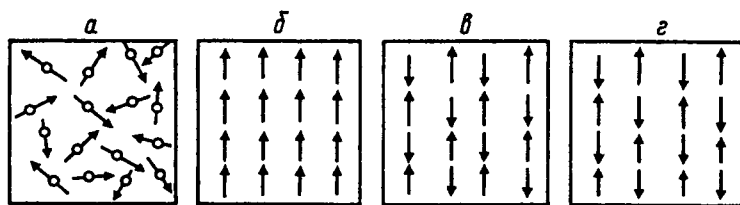


Рис. 32. Схемы ориентации магнитных моментов атомов для парамагнетиков (а), ферромагнетиков (б), антиферромагнетиков (в) и ферримагнетиков (г)

Ферромагнитные свойства обнаружены также в металлических стеклах и аморфных полупроводниках.

У некоторых веществ более выгодным является антипараллельное упорядочение магнитных моментов в доменах. В этом случае домен состоит из двух подрешеток с противоположной ориентацией магнитных моментов атомов. Если магнитные моменты двух подрешеток скомпенсированы, то такие вещества называют **антиферромагнетиками**, если же не скомпенсированы, то возникает результирующий магнитный момент и такие вещества называют **ферримагнетиками**. Антиферромагнитные материалы относятся к группе парамагнетиков, а ферримагнитные — к группе ферромагнетиков.

К антиферромагнетикам относятся ряд элементов (твердый кислород, Cr, α -марганец и др.) и порядка тысячи известных химических соединений металлов (NiF_2 , FeO и др.). Значительная часть ферримагнетиков — это диэлектрические или полупроводниковые ионные кристаллы, содержащие магнитные ионы различных элементов или одного элемента, но находящиеся в разных кристаллографических позициях (в неэквивалентных узлах кристаллической решетки). К ферримагнетикам относятся также ряд упорядоченных металлических сплавов, интерметаллиды и главным образом различные оксиды, в том числе ферриты.

Вещества даже одного и того же химического состава в зависимости от кристаллического строения и фазового состава могут находиться в различных магнитных состояниях. Например, Fe, Co и Ni с кристаллическим строением ниже определенной температуры (*точка Кюри*) обладают ферромагнитными свойствами, а выше этой температуры они парамагнитны. Переход из парамагнитного состояния в антиферромагнитное происходит при понижении температуры (ниже *температуры Нееля* T_N) и представляет собой фазовое превращение 2-го рода. У некоторых редкоземельных металлов между ферро- и парамагнитной температурными областями существует антиферромагнитная область.

Под влиянием внешнего магнитного поля в веществах протекают процессы **намагничивания**, т.е. изменения намагниченности, и возникают дополнительные магнитные моменты:

- **диамагнитный**, обусловленный орбитальным движением электронов;
- **парамагнитный**, складывающийся из спиновых магнитных моментов атомов и движения свободных электронов.

Преобладание той или другой составляющей определяет **магнитные свойства** материалов, характеризующие их способность намагничиваться при воздействии внешнего магнитного поля.

Диамагнетизм — свойство веществ (*диамагнетиков*) намагничиваться в направлении, противоположном действующему на них внешнему магнитному полю. Диамагнетизм присущ всем веществам, однако во многих случаях он маскируется парамагнетизмом, ферромагнетизмом и др. Диамагнетиками являются инертные газы (N_2 , H_2), некоторые металлы (Si, P, Bi, Zn, Cu, Au, Ag, Hg), растворы, сплавы и химические соединения (например, галогенов), а также многие органические и неорганические соединения с неполярной связью. Намагниченность, связанная с диамагнетизмом, обычно невелика, и исключения представляют сверхпроводники, которые иногда относят к диамагнетикам.

Парамагнетизм — свойство веществ (*парамагнетиков*), помещенных во внешнее магнитное поле, намагничиваться в направлении, совпадающем с направлением этого поля. В парамагнетиках происходит ориентация хаотически колеблющихся магнитных моментов атомов или ионов в направлении поля. Парамагнетизм наблюдается у щелочных (Li, K, Na и др.), щелочно-земельных (Ca, Ra, Ba) и переходных металлов (кроме Fe, Ni, Co, Mn, Cr).

В ферромагнетиках под действием внешнего магнитного поля число и размеры доменов, намагниченных по полю, увеличиваются за счет других доменов. Рост доменов обусловлен движением доменных стенок. Кроме того, векторы намагниченности отдельных доменов могут поворачиваться по полю. Изменение формы, размеров и ориентации доменов может привести к **магнитострикции**.

Магнитострикция — изменение формы и размеров кристаллического вещества при его намагничивании. Эффект магнитострикции используется, например, для получения ультразвука.

В достаточно сильном магнитном поле ферромагнитный образец намагничивается до насыщения. Намагниченность насыщения — это состояние ферромагнетика, при котором его намагниченность J достигает предельного значения J_∞ , не меняющегося при дальнейшем увеличении напряженности намагничивающего поля. При этом образец состоит как бы из одного домена с намагниченностью насыщения, направленной по полю.

Намагниченность насыщения чистых металлов является константой и не изменяется при пластической деформации или термической обработке. Намагниченность насыщения однофазных сплавов определяется их составом, а гетерогенных, состоящих из ферромагнитной и парамагнитной фаз, — составом и количеством ферромагнитной фазы. Она

не зависит от дисперсности фаз, уровня микро- и макронапряжений, изменения плотности дислокаций. Таким образом, намагниченность насыщения не является структурно-чувствительным свойством.

Основные магнитные характеристики материалов. К основным магнитным характеристикам материалов относятся *магнитная восприимчивость, магнитная индукция и магнитная проницаемость*.

Магнитная восприимчивость (κ) — величина, характеризующая связь намагниченности вещества J с напряженностью магнитного поля H :

$$\kappa = J/H. \quad (18)$$

Уравнение (18) не распространяется на ферромагнетики.

Магнитная восприимчивость может быть как положительной, так и отрицательной. Отрицательной магнитной восприимчивостью обладают диамагнетики, они намагничиваются против поля; положительной — парамагнетики и ферромагнетики, они намагничиваются по полю.

Магнитная восприимчивость характеризует способность веществ к намагничиванию под действием магнитного поля. Она определяется главным образом содержанием ферромагнитных включений, а также их формой, размером и расположением друг относительно друга. Магнитная восприимчивость одного и того же вещества меняется в зависимости от величины магнитного поля и его магнитной предыстории, так как в процессе намагничивания в ферромагнитных включениях могут происходить обратимые и необратимые явления. С учетом последнего различают *обратимую и необратимую магнитную восприимчивость*.

Магнитная индукция (B) — среднее результирующее магнитное поле вещества, представляющее собой среднее значение суммарной напряженности микроскопических магнитных полей, созданных отдельными электронами и другими элементарными частицами, Тл:

$$B = \mu_0 (H + J), \quad (19)$$

где $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Магнитная проницаемость μ — величина, показывающая во сколько раз увеличивается (уменьшается) магнитная индукция в веществе при воздействии магнитного поля напряженностью H . Магнитная проницаемость ферромагнетиков сложно зависит от H . Различают *начальную магнитную проницаемость* μ_n , измеряемую в очень слабых магнитных полях — при значениях напряженности магнитного поля H , близких к нулю, и *максимальную магнитную проницаемость* μ_m .

Параметрами магнитной проницаемости являются:

- *относительная магнитная проницаемость* — μ_0 ;
- *абсолютная магнитная проницаемость* — μ_a , Гн/м:

$$\mu_a = \mu_0 \mu. \quad (20)$$

Между величинами магнитной восприимчивости и магнитной проницаемости существует зависимость:

$$\kappa = \mu - 1. \quad (21)$$

Графическое изображение зависимости намагниченности ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля называется **кривой намагничивания** (рис. 33). Кривые намагничивания определяют характеристики магнитных материалов и служат для расчетов магнитных цепей электромагнитов, магнитных пускателей, реле и других электротехнических устройств и приборов.

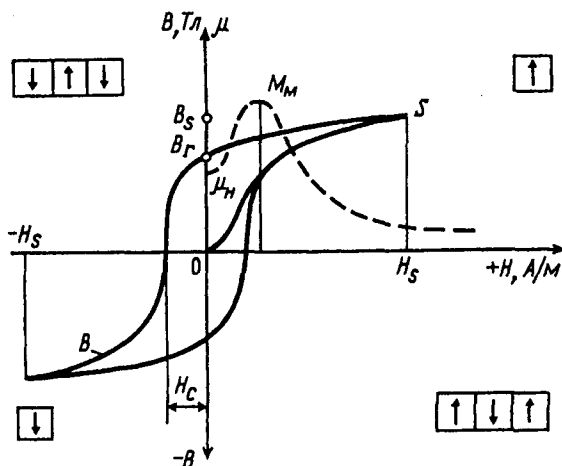
Кривые намагничивания ферромагнитных материалов при перемагничивании образуют *петлю магнитного гистерезиса* (если первоначально не намагниченное вещество намагнитить до насыщения, а затем уменьшать и снова увеличивать напряженность магнитного поля, то изменение индукции не будет следовать начальной кривой). Площадь петли магнитного гистерезиса пропорциональна энергии, теряемой в образце на его нагревание за один цикл изменения поля (*гистерезисные потери*). Характерными точками магнитного гистерезиса являются *коэрцитивная сила* и *остаточная намагниченность*.

Гистерезис — запаздывание изменения физической величины, характеризующей состояние тела от изменения другой физической величины, определяющей внешние условия. Графически неоднозначная зависимость величины физического свойства от циклически изменяющихся параметров, определяющих внешние условия, изображается петлей гистерезиса.

Коэрцитивная сила H_c — значение напряженности магнитного поля, в котором ферромагнитный образец, первоначально намагниченный до насыщения, полностью размагничивается. В отличие от намагниченности насыщения она является структурно-чувствительным свойством. Нали-

Рис. 33. Кривая намагничивания:

B_s — намагниченность насыщения; B_r — остаточная намагниченность, т.е. величина намагниченности ($J_r = B_r$), которую ферро- или ферримагнитные материалы имеют при напряженности внешнего поля, равной нулю, Тл; H_c — коэрцитивная сила, т.е. значение напряженности магнитного поля, необходимое для полного размагничивания вещества, А/м



чие в образцах примесей и других дефектов кристаллической решетки затрудняет движение границ магнитных доменов и тем самым повышает коэрцитивную силу. Чистые металлы, а также твердые растворы, не претерпевающие упорядочения, как правило, характеризуются низким ее значением. Применение пластической деформации повышает коэрцитивную силу этих металлов и сплавов, но по абсолютной величине она остается невысокой.

У сплавов с гетерогенной структурой коэрцитивная сила повышенная: при этом тем больше, чем выше дисперсность структуры. Рост коэрцитивной силы особенно значителен при высокой дисперсности ферромагнитной фазы, каждая частица которой является однодоменной и анизотропной. Ее также увеличивает рост микронапряжений и плотности дислокаций, как, например, в случае закалки стали на мартенсит.

Остаточная намагниченность B_r — величина намагниченности, которую ферро- или ферритмагнитные материалы имеют при напряженности внешнего поля, равной нулю. Обусловлена задержкой изменения намагниченности при уменьшении напряженности (после предыдущего намагничивания образца) из-за влияния магнитной анизотропии и структурных неоднородностей образца. Наиболее устойчивой остаточной намагниченностью обладают материалы с высокой коэрцитивной силой. При нагревании ферромагнитных материалов выше точки Кюри, они теряют остаточную намагниченность. К уменьшению остаточной намагниченности приводят также механические сотрясения и вибрации.

Все материалы по величинам магнитных восприимчивости и проницаемости делятся на *ферромагнитные* ($\mu \geq 1$, $\kappa > 0$), *парамагнитные* ($\mu > 1$, $\kappa > 0$) и *диамагнитные* ($\mu < 1$, $\kappa < 0$).

Величина магнитной восприимчивости κ для пара- и диамагнитных материалов очень мала (от 10^{-4} до 10^{-6}), для ферромагнитных (металлов переходных групп) — от нескольких десятков до тысяч единиц, причем она сильно и сложным образом зависит от напряженности намагничивающего поля.

По величине магнитной проницаемости электротехнические материалы подразделяются на *немагнитные* и *магнитные*.

Немагнитные материалы — пара-, диа- и слабоферромагнитные материалы с магнитной проницаемостью менее 1,5. К немагнитным материалам относятся большинство металлов и сплавов (в том числе некоторые стали), полимеры, дерево, стекло и т.д.

Магнитные материалы классифицируют по их физической природе и величине коэрцитивной силы. По физической природе они делятся (отраслевое деление) на три группы: *металлические*, *неметаллические* и *магнитодиэлектрики*.

К неметаллическим магнитным материалам относятся **ферриты** — ферромагнитные материалы, получаемые из порошкообразной смеси оксидов некоторых переходных металлов и оксида железа путем прессования с последующим спеканием. По магнитным свойствам ферриты аналогичны ферромагнетикам.

Магнитодиэлектрики — композиционные материалы, состоящие из 70...80% порошкообразного магнитного материала (ферро- или ферри-магнетика) и 30...20% диэлектрического материала (например, полистирола, резины и др.). Магнитодиэлектрики применяются в приборостроении (постоянные магниты, эластичные герметизаторы для разъемных соединений и др.).

Ферриты и магнитодиэлектрики отличаются от металлических магнитных материалов высокими значениями объемного удельного сопротивления ($\rho_0 = 10...10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), что резко снижает потери на вихревые токи. Это позволяет использовать эти материалы в технике высоких частот. Кроме того, ферриты обладают стабильностью своих магнитных характеристик в широком диапазоне частот.

По величине коэрцитивной силы магнитные материалы делятся на *магнитно-мягкие* — не более 4 А/м и *магнитно-твердые (магнитно-жесткие)* — более 4 А/м.

Магнитно-мягкие материалы намагничиваются до насыщения и перемангничиваются в относительно слабых магнитных полях напряженностью $H \sim 8...800 \text{ А/м}$ ($\sim 0,1...10 \text{ Э}$). При температурах ниже точки Кюри эти материалы спонтанно намагничены, но внешне не проявляют магнитных свойств, так как состоят из хаотически ориентированных, намагниченных до насыщения доменов. Магнитно-мягкие материалы обладают относительно большими значениями магнитной проницаемости, малой коэрцитивной силой и относительно большой индукцией насыщения. Эти материалы отличаются малыми потерями на гистерезис и вихревые токи на один цикл намагничивания.

К магнитно-мягким материалам относятся: чистое (электромагнитное) железо, листовая электротехническая сталь, железо-армко, пермаллой (железоникелевые сплавы), а также металлические стекла и некоторые ферриты. К магнитно-мягким материалам специального назначения относятся термомагнитные сплавы и магнитострикционные материалы.

Магнитно-мягкие материалы применяются для изготовления магнитопроводов трансформаторов, электрических машин и аппаратов, магнитных экранов и др., где требуется быстрое намагничивание с малыми потерями энергии. Термомагнитные материалы служат для компенсации температурных изменений магнитных потоков в магнитных системах приборов, а магнитострикционные материалы — для преобразования электромагнитной энергии в механическую.

Магнитно-твердые материалы намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряженностью в тысячи и десятки тысяч А/м. Они отличаются широкой гистерезисной петлей, т.е. обладают большими величинами коэрцитивной силы и остаточной индукции. Эти материалы, будучи намагничеными, могут длительное время сохранять сообщенную им энергию, т.е. могут служить источниками постоянного магнитного поля. Магнитно-твердые материалы оценивают еще величиной максимальной удельной энергии W_m (энергии, создаваемой магнитом в воздушном зазоре в режиме намагничивания между полюсами магнита и отнесенной к единице объема магнита): $W_m = BH/2$, Дж/м³.

К металлическим магнитно-твердым материалам относятся легированные стали, закаливаемые на мартенсит; специальные сплавы на основе Fe-Ni-Al и Fe-Ni-Co, легированных медью, титаном, ниобием и др. Большое значение в технике приобрели порошковые сплавы и ферриты. В качестве магнитно-твердых материалов используются также *магнитопласты* и *магнитоэласты* из порошков сплавов и ферритов со связкой из пластмасс и резины.

Магнитно-твердые материалы применяются для изготовления постоянных магнитов.

1.7. Свойства веществ и материалов в основных физико-химических процессах

1.7.1. Старение

Старение — изменение физико-химических свойств материала, протекающее либо самопроизвольно в процессе достаточно длительной выдержки при комнатной температуре (*естественное старение*), либо при нагреве (*искусственное старение*).

Старение обычно обусловлено недостаточно стабильным состоянием материала и постепенным его переходом в стабильное. Старение материала может приводить как к улучшению, так и ухудшению отдельных его свойств. Во многих случаях технологическими процессами предусматриваются операции искусственного старения материалов с целью улучшения их свойств.

К *старению металлов и сплавов* следует относить все процессы изменения во времени их свойств, связанные с превращениями металлов и сплавов в твердом состоянии. К основным видам превращений в твердом состоянии относятся аллотропическое и мартенситное превращения, распад мартенситной структуры, растворение в твердом состоянии и распад пересыщенных твердых растворов, упорядочение и разупорядочение твердых растворов, образование твердого раствора из эвтектидной смеси.

Все эти процессы можно разделить на две группы:

- превращения, связанные с изменением кристаллического строения (протекающие без изменения химического состава образующихся при этом превращении фаз);
- превращения, сопровождающиеся образованием фаз с измененным химическим составом.

Наибольшее значение для металлов и сплавов имеют процессы старения, связанные с распадом пересыщенных твердых растворов (*процессы выделения*) и распадом мартенситной структуры (тем более что чистые металлы применяются очень редко). Эти процессы обусловлены метастабильным состоянием сплава в результате технологической обработки, вызывающей искажения кристаллической решетки (например, закалки, наклепа и др.). Старение сопровождается самопроизвольным переходом сплава из метастабильного состояния в стабильное, характеризующееся более низким уровнем внутренней энергии.

При *старении полимеров* изменяются химический состав, молекулярный вес, характер взаимодействия макромолекул и структура, определяющие физико-химические свойства этих материалов: прочность, твердость, пластичность, эластичность, растворимость, электрические свойства и др.

Старение полимерных материалов обусловлено в основном процессами *деструкции* и *сшивания макромолекул* полимера.

Деструкция — процесс, протекающий в полимерном материале с разрывом химических связей в основной цепи макромолекулы и приводящий к уменьшению степени полимеризации и (или) числа поперечных химических связей.

Деструкция происходит под влиянием физических (тепло, свет, ионизация и др.) и химических (кислород, озон, вода и др.) факторов. Физические факторы оказывают влияние на перемещения макромолекул или их сегментов, а химические — вызывают разрыв химических связей, уменьшение размеров макромолекул, часто взаимосвязанное с изменением их химического состава. Если преобладает деструкция, то полимер (например, натуральный каучук) размягчается; выделяются летучие вещества.

Сшивание макромолекул — образование поперечных химических связей между макромолекулами. При сшивании макромолекул с ростом числа поперечных связей уменьшается растворимость полимеров, повышаются твердость, хрупкость, наблюдается потеря эластичности и вязкости (полистирол, бутадиеновый каучук и др.).

Таким образом, деструкция и сшивание макромолекул оказывают прямо противоположное влияние на свойства полимера.

Для конкретных условий эксплуатации различают следующие виды старения полимерных материалов: *термическое, световое, окислительное,*

озонное, радиационное, химическое, при воздействии биологических факторов, электрическое, ультразвуковое, при воздействии механических факторов, климатическое, в космосе, в воде, во влажной среде, в живом организме, в почве, в грунте.

Механическое воздействие (например, многократная деформация) ускоряет старение. Влага на старение полимеров действует менее существенно. Электрическое старение полимерных диэлектриков (снижение электрической прочности, например, в кабелях, конденсаторах, обмотках электродвигателей) может происходить при достаточно высоком напряжении путем ионизации под действием озона и оксидов азота, образующихся при этом. Такое старение протекает при постоянном напряжении медленнее, чем при переменном.

В конструкции современных самолетов число резинотехнических изделий составляет более 50 тыс. единиц; в изделиях электронной техники количество неметаллических материалов достигает 60% общего количества применяемых материалов. Более 60% используемых в технике полимерных материалов и лакокрасочных покрытий разрушаются вследствие старения и биоповреждений или не сохраняют свои свойства.

Старению полупроводников способствуют субмикроскопические дефекты материала, микроскопические дефекты на их поверхности, изменение температур, влажности, наличие примесей в материале. При этом возможны уменьшение обратного напряжения пробоя, увеличение обратного тока и шума, микроплазменные эффекты и др.

1.7.2. Изнашивание

Изнашивание — процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела (детали). Наука, изучающая процессы изнашивания с учетом свойств материалов, в том числе в присутствии смазочных материалов, называется **трибологией**.

Трение (внешнее трение) — явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним. Характеристикой внешнего трения служит **коэффициент трения**.

Коэффициент трения — отношение силы трения двух тел (деталей) к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу.

Результат изнашивания, определяемый в установленных единицах, называется **износом**. Значение износа может выражаться в единицах длины, объема, массы и др. Испытания на износ проводят самыми различными методами, и следует помнить, что результаты таких испытаний несопоставимы.

В технике следует различать *моральный* и *физический износ*. Морально устаревшими считаются машины, конструкции, материалы, если они в результате общего технического прогресса оказываются малопригодными для удовлетворения нужд производства, хотя еще вполне работоспособны. Такой моральный износ здесь не рассматривается.

Изнашивание материалов (изделия) может происходить при скольжении, ударе, качении, скольжении с качением и т.д., а также под воздействием среды (жидкость, газ и др.). При изнашивании внутри нагруженных областей поверхностного слоя материала возбуждается целый ряд физико-химических процессов: сорбция, диффузия, теплообразование, фазовые превращения и химические реакции. При этом изменяются структура и химический состав материала, а следовательно, и его свойства. В нагруженных областях происходит накопление энергии и могут возникнуть трещины, которые развиваются и приводят к разрушению материала. Изнашивание всегда связано с потерями энергии, накопленной в материале.

При механическом, коррозионно-механическом (окислительном) и молекулярно-механическом воздействиях проявляются основные *виды изнашивания* (табл. 3). Причем различные виды изнашивания могут действовать как одновременно, так и последовательно; при взаимодействии один из них может задерживать или активизировать другие виды изнашивания.

Таблица 3

Классификация видов изнашивания

Способ воздействия при изнашивании	Вид изнашивания
Механическое	<i>Абразивное</i> — в результате режущего или царапающего действия твердых частиц, попадающих в зону контакта <i>Адгезионное</i> — в результате связи между поверхностными слоями двух разнородных тел при их соприкосновении <i>Эрозионное</i> — под влиянием механических воздействий твердыми частицами в потоке жидкости или газа <i>Кавитационное</i> — в результате ударов жидкости при схлопывании парогазовых пузырей на поверхности детали <i>Усталостное</i> — под влиянием циклических контактных напряжений сжатия
Коррозионно-механическое	<i>Окислительное</i> — в результате химического взаимодействия материала с компонентами окружающей среды путем среза непрерывно возобновляющихся окисных пленок <i>Фреттинг-коррозия</i> — возникающая при очень малых колебательных перемещениях сопряженных поверхностей, обусловленных деформациями и люфтами
Молекулярно-механическое	<i>Схватывание и заедание</i> — повреждение поверхностей в результате действия молекулярных сил и механического воздействия

В технике наибольшее распространение имеет коррозионно-механическое изнашивание, т.е. изнашивание при наличии на поверхности защитных пленок. Такое изнашивание наблюдается, когда в результате трения на самой поверхности толщиной $\sim 10^3$ нм образуется вторичная структура, содержащая большое количество оксидов. Под вторичной структурой располагается сильно деформированный слой материала с высокой плотностью дислокаций толщиной до нескольких микрометров. Наличие вторичной структуры уменьшает износ поверхностного слоя.

Коррозионно-механическое изнашивание наблюдается в подшипниках скольжения, валах, втулках, поршневых кольцах и т.д. При нормальном окислительном изнашивании коэффициент трения равен 0,01...0,10, а толщина разрушающегося слоя составляет 0,001...0,01 мм.

Характеристикой изнашивания служит *износостойкость*.

Износостойкость (износоустойчивость) — свойство материала оказывать в определенных условиях трения сопротивление изнашиванию, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

Износостойкость определяется сочетанием свойств трущихся материалов, качеством контактирующих поверхностей (чистота поверхности, смазка), характером движения (скольжение, качение, удары, течение), скоростью взаимного перемещения, уровнем нагрузки, отводом отделяющихся частиц (продуктов износа) или присутствием частиц какого-либо другого материала, осложняющего трение.

Износостойкость чистых металлов пропорциональна их твердости, но в сплавах эта зависимость может не выполняться.

1.7.3. Диффузия

Диффузия — движение частиц среды, приводящее к необратимому переносу вещества или к установлению равновесного распределения концентраций частиц данного сорта в среде. В качестве диффундирующих частиц рассматривают молекулы, атомы, электроны проводимости, дырки, нейтроны и другие частицы. Диффузия в твердых веществах приводит к переносу атомов на расстояния, превышающие межатомные расстояния для данного вещества.

Частным случаем диффузии в чистом веществе или растворе постоянно-го состава, при котором диффундируют собственные частицы вещества, а его химический состав не меняется, является **самодиффузия**. При самодиффузии диффузионные перемещения частиц твердого вещества могут приводить к изменению его формы и другим явлениям. Так, длительное воздействие сил поверхностного натяжения, тяжести, упругих, электрических и др. может привести к сращиванию двух шлифованных поверхностей образцов одного и того же вещества, спеканию порошков, растягиванию образцов

под действием подвешенного к ним груза (диффузионная ползучесть материалов) и т.д.

В отсутствие макроскопического движения среды диффузия молекул (атомов) определяется их тепловым движением. При наличии в среде стационарных перепадов температуры, электрических полей и т.п. диффузия приводит к установлению равновесного распределения концентраций, характеризуемого соответствующими градиентами (*термодиффузия*, *электродиффузия* и т.п.). В однородной системе (газ, жидкость) при молекулярной диффузии в отсутствие внешних воздействий диффузионный поток (поток массы) пропорционален градиенту его концентрации. Коэффициент пропорциональности называется *коэффициентом диффузии*. Последний зависит от строения и структуры взаимодействующих веществ и особенно сильно — от температуры.

В твердых кристаллических веществах различают следующие виды диффузии: *по механизму протекания*, *по геометрическому месту переноса атомов*, *по месту поглощения атомов* и *по природе процесса*.

Механизм протекания диффузии может быть *межузельным*, *вакансионным*, *обменным* и *циклическим* (рис. 34). Реализация того или иного механизма протекания диффузии определяется кристаллическим строением вещества и типом дефектов его кристаллической решетки. Так, доказано, что основным механизмом диффузии примесных атомов в твердых растворах замещения является вакансионный, а в твердых растворах внедрения — межузельный.

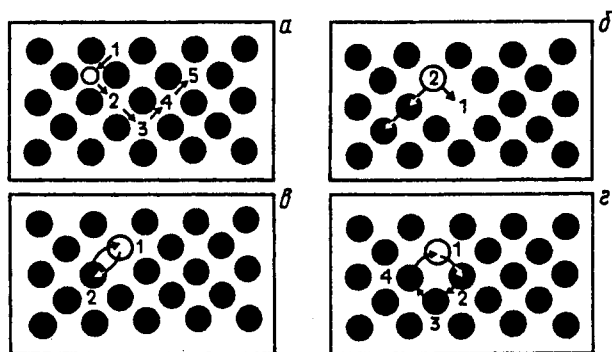


Рис. 34. Схемы механизмов протекания диффузии:

а — межузельный; б — вакансионный; в — обменный; г — циклический

По геометрическому месту переноса атомов выделяют *объемную*, *поверхностную* (из внешней среды) и *границную* (по границам зерен) диффузии. Для совершения элементарного акта диффузии атом должен преодолеть энергетический барьер. Наиболее легко диффузия протекает по поверхности и границам зерен, где сосредоточены дефекты кристал-

лического строения (вакансии, дислокации и др.). Объемная диффузия в твердых веществах обусловлена перескоками атомов из одного положения в другое, относительно свободное.

Поверхностная диффузия связана с переносом вещества или на поверхность материала из внешней среды, или с поверхности материала во внешнюю среду, или на поверхность материала из его объема, или же в глубь материала с его поверхности (*сорбционные процессы*).

Сорбция — поглощение твердым телом или жидкостью какого-либо вещества из окружающей среды. Поглощающее тело называется сорбентом, поглощаемое — *сорбтивом* (*сорбатом*).

По месту поглощения атомов различают поверхность и объем. При этом сорбционные процессы, протекающие на поверхности, называются *адсорбцией*, а в объеме — *абсорбцией*. Сорбционные процессы избирательны и обратимы. Обратный процесс выделения поглощенного компонента называется *десорбцией*.

Адсорбция — поглощение вещества из газовой или жидкой среды поверхностным слоем твердого тела (адсорбента) или жидкости.

Абсорбция — поглощение какого-либо вещества из окружающей среды всей массой поглощающего тела (абсорбента). Абсорбция жидким абсорбентом какого-либо компонента из газовой смеси называется *растворением*, из жидкой смеси — *экстракцией*.

Природу диффузии по характеру сорбционных процессов рассматривают как *физическую*, если вещество при сорбционных процессах сохраняет все свои свойства, или *химическую* (*хемосорбция*), если вещество в этих процессах вступает в реакции. При физической природе сорбционных процессов обусловлены вандерваальсовыми силами притяжения частиц окружающей среды к частицам вещества.

Диффузия молекул в полимерах отличается от диффузии в кристаллических веществах. Отличия обусловлены большими размерами и массой молекул полимеров и их малой тепловой энергией. С процессом диффузии связаны структурные изменения в материалах, которые могут ухудшать их физические и механические свойства. Диффузия в значительной степени определяет кинетику физико-химических процессов, обуславливающих разрушение материалов, ползучесть, старение, коррозию и др. Адсорбция газов или жидкостей из внешней среды приводит к ухудшению диэлектрических свойств изоляционных материалов, понижает прочность металлов и изменяет другие свойства.

1.7.4. Коррозия

Коррозия — самопроизвольное разрушение веществ, вызванное химическими и электрохимическими процессами, развивающимися на их поверхности, при взаимодействии с внешней средой. Среду, разрушительно действующую на материал, принято называть *агрессивной*.

Коррозионному разрушению подвержены металлы, бетон, строительный камень, дерево, некоторые пластмассы и другие конструкционные и строительные материалы. Специфической особенностью коррозии является то, что она может происходить как при функционировании, так и при хранении изделий.

Важнейшими характеристиками коррозии являются ее *скорость* и *коррозионная стойкость* материалов.

Скорость коррозии — масса вещества, превращенная в продукты коррозии, с единицы поверхности материала в единицу времени.

На скорость коррозии оказывают влияние внутренние и внешние факторы. К внутренним факторам относятся химический состав и структура материала, состояние его поверхности, наличие напряжений и др., причем с увеличением неоднородности состава и структуры наблюдается возрастание скорости коррозии. К внешним факторам относятся вид и состав окружающей среды и условия, при которых протекают физико-химические процессы (температура, давление, скорость потока агрессивной среды и др.). В промышленной атмосфере, по данным многих исследований, скорость коррозии используемых материалов составляет в среднем 575 г/м^2 в год. Ежегодные потери, например, США от коррозии оцениваются более чем в 100 млрд долл.

Коррозионная стойкость — способность вещества сопротивляться химическому и электрохимическому воздействию среды, т.е. разьеданию или частичному растворению. Коррозионная стойкость материала определяется по величине скорости его коррозии.

Различают следующие виды коррозии: *по характеру взаимодействия со средой; по геометрическим характеристикам мест разрушения; по типу коррозионной среды и по характеру дополнительно воздействующих факторов.*

По механизму взаимодействия со средой выделяют *химическую и электрохимическую коррозии.*

Химическая коррозия возникает в сухих газах (газовая коррозия) и неэлектролитах (средах, не проводящих электрический ток: в бензине, бензоле и др.). Процесс химической коррозии сопровождается образованием оксидов, гидрооксидов и других соединений, которые могут оставаться на поверхности материала в виде пленок, в том числе защищающих материал от дальнейшего действия агрессивной среды.

Электрохимическая коррозия протекает в средах, проводящих электрический ток, и ее протекание описывается законами электрохимической кинетики.

По геометрическим характеристикам мест разрушения различают коррозию *объемную и поверхностную*, а по степени охвата (локализации) — *сплошную, местную, нитевидную, точечную, избирательную* и др. Так, точечная коррозия может дать начало *подповерхностной коррозии*, рас-

пространяющейся в стороны под очень тонким слоем поверхности вещества, который затем вздувается пузырями или шелушится. Этому виду коррозии подвержены в определенных условиях, например в морской воде, хромоникелевые стали с добавкой молибдена.

По типу коррозионной среды различают *атмосферную, газовую, жидкостную, морскую, почвенную, подземную* и другие виды коррозии.

По характеру дополнительно воздействующих факторов рассматривают процесс коррозии при трении (*коррозионная эрозия*), под напряжением (*коррозионное растрескивание и коррозионная усталость*), *контактную и щелевую коррозии* и др:

Для обеспечения коррозионной стойкости используют в основном два метода: отделение материала от агрессивной среды (*конструктивные методы*) и придание среде нужных антикоррозийных свойств (*технологические методы*). К конструктивным методам относятся различные способы предохранения от проникновения агрессивных сред, а также способы электрохимической защиты, а к технологическим — защитные покрытия, упрочнение поверхности, использование *ингибиторов* (веществ, исключающих или замедляющих коррозию) и др.

Защитные покрытия наносят на поверхность изделий из различных материалов для предотвращения коррозии, придания им декоративного вида, создания специальных поверхностных свойств (электропроводности, теплопроводности, электроизоляционных, магнитных и немагнитных свойств, светоотражающей и поглощающей способности, износостойкости и др.). Для защиты от коррозии используются металлические, неметаллические неорганические (оксидные, фосфатные, фторидные и др.) и органические, лакокрасочные и другие защитные покрытия.

Защитные покрытия по условиям эксплуатации делят на группы: *легкие — Л; средние — С; жесткие — Ж; очень жесткие — ОЖ*. Эти покрытия классифицируют по способу получения, материалу, физико-химическим и декоративным свойствам. Технология нанесения покрытий и методы контроля их качества приведены в ГОСТ 16976—71.

Защита материалов от коррозии решается во всех странах на государственном уровне. В общей системе мер по борьбе с коррозией важная роль принадлежит стандартизации. В Российской Федерации все мероприятия по защите материалов от коррозии установлены в действующих государственных стандартах, объединенных в «*Единую систему защиты от коррозии и старения материалов и изделий*» (ЕСЗКС). В настоящее время в этой системе действуют 225 государственных и межгосударственных стандартов. Эти стандарты — концентрированный итог выполнения более 2 тыс. НИР и ОКР, а также результат работ по их гармонизации с международными и национальными зарубежными стандартами. По оценке специалистов, широкое применение уже имеющихся способов

защиты от коррозии, включенных в международные и государственный стандарты ЕСЗКС, позволяет сократить ущерб от этого вида разрушения на 10...15%.

1.8. Технологические свойства

Технологические свойства материалов определяют возможность изготовления продукции при использовании данного материала (сырья). При этом материал должен удовлетворять требованиям минимальной трудоемкости при изготовлении. К технологическим свойствам материалов относят свойства, определяющие возможности их литья, обрабатываемости давлением и резанием, свариваемости, упрочняемости, восприимчивости к закалке и др. Рассмотрим наиболее распространенные технологические свойства.

Литейные свойства определяются совокупностью показателей, включающей температуры плавления, кипения, заливки и кристаллизации, плотность и жидкотекучесть расплава, литейную усадку и др. Литейная усадка — это типичное технологическое свойство.

Обрабатываемость давлением в горячем и холодном состояниях оценивают различными технологическими пробами (на осадку, изгиб, вытяжку сферической лунки и др.), характеристиками пластичности, твердости и упрочнения материала при температуре обработки. Среди характеристик обрабатываемости давлением используют, например, *ковкость*.

Ковкость — способность металлов и сплавов подвергаться ковке и другим видам обработки давлением (прокатке, волочению, прессованию, штамповке). Характеризуется пластичностью и сопротивлением деформации.

Обрабатываемость резанием металлов и сплавов оценивается скоростью затупления резца при точении на заданных режимах резания с обеспечением необходимых параметров шероховатости поверхности и выражается в процентах от обрабатываемости стандартного материала. На основании данных об обрабатываемости различных материалов составляются нормативы режимов резания или рекомендации по выбору режимов резания для конкретных условий обработки.

Обрабатываемость камня оценивается его податливостью механическому, термическому, электрическому и другим воздействиям для придания ему необходимых формы, размеров и фактуры. В качестве показателя обрабатываемости камня используют коэффициент обрабатываемости, представляющий собой отношение трудозатрат при обработке единицы продукции из данного вида камня к аналогичному показателю, соответствующему эталонному материалу. В зависимости от вида воздействия выделяют конкретные характеристики обрабатываемости: пилимость, полируемость, истираемость, шлифуемость и др. Общепринятого метода оценки обрабатываемости камня не существует.

Свариваемость — способность материала образовывать неразъемные соединения с требуемыми механическими характеристиками. Ее оценивают сравнением свойств основного материала со свойствами сварных соединений, количеством способов сварки, диапазоном допускаемых режимов сварки и др. Свариваемость считается тем выше, чем больше способов сварки может быть применено, шире пределы допускаемых режимов сварки. Для технологической оценки свариваемости определяют структуру, механические свойства и склонность к образованию трещин материала шва и околошовной зоны.

Надежность сварного соединения — это свойство сварных участков выдерживать в течение длительного времени комплексное нагружение, которое обычно воздействует на соответствующую деталь или сварную конструкцию. Испытания проводят на специальных образцах, а наиболее жесткие условия испытаний создаются путем выбора соответствующих формы образца и типа нагружения.

Испытания технологических свойств (технологические испытания) относятся к самым старым видам испытаний материалов. Отличительной их чертой является определение возможности применения материала в данном способе производства или для специальных целей использования. При этом в отличие от других методов испытания, определяются не отдельные значения свойств с минимальной погрешностью измерения, а оценивается общее состояние материала.

С повышением степени стандартизации для методов технологических испытаний в настоящее время установлены строго определенные нормы, которые связаны с той или иной технологией производства. Информацию о методе технологического испытания для конкретного материала можно получить в ежегодном Указателе государственных стандартов.

1.9. Потребительские свойства

Потребительские свойства материалов определяют возможность их использования при максимальной работоспособности в условиях эксплуатации или потребления. Перечень и величина потребительских свойств в обязательном порядке устанавливаются в государственных стандартах, что создает законодательные основы гарантии качества и безопасности используемых веществ и материалов. Для каждого материала перечень потребительских свойств, называемый *номенклатурой показателей качества*, устанавливается в стандартах «Система показателей качества».

Показателями качества могут быть как показатели физических свойств, величины которых определены в стандартных условиях, так и специфические показатели, определяющие возможность максимальной работоспособности материала в условиях эксплуатации или потребления.

В номенклатуре показателей качества последние распределены по следующим группам: *назначение, надежность, эргономичность и эстетичность, технологичность, унификация, стандартизация, патентно-правовые показатели, экологические показатели, безопасность, транспортабельность.*

Показателем качества, имеющим социальное и технико-экономическое значение, является *надежность*.

Надежность — свойство объекта сохранять во времени и в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

В группу показателей надежности входят такие характеристики, как *долговечность, сохраняемость, безотказность, ремонтпригодность* и др. На материалы распространяются в основном такие показатели надежности, как долговечность и сохраняемость.

Долговечность — свойство материала сохранять работоспособность до предельного состояния, которое определяется степенью разрушения, требованиями безопасности или экономическими соображениями. Потребительские свойства материалов, используемые для оценки их долговечности, можно разделить по области применения на две группы:

1) свойства, позволяющие оценить прочность, твердость или изменение формы изделия при воздействии окружающей среды (поток масс и излучений, агрессивности среды и т.п.);

2) свойства, используемые для оценки последствий механических воздействий на прочностные показатели материалов, в том числе при различных параметрах окружающей среды.

Для свойств первой группы в их наименовании традиционно используется слово «стойкость». Так, для оценки прочности при воздействии окружающей среды используются термины *атмосферо-, свето-, химическая, радиационная, водо-, огне-, жаро-, термо-, морозо-, холодо-* и др., а для оценки твердости — *красностойкость*. Для оценки способности сохранять форму при воздействии окружающей среды используют термины «*огнеупорность*» и «*теплостойкость*».

Атмосферостойкость — способность материала сопротивляться разрушающему действию солнечных лучей, дождя, мороза, снега, ветра и других атмосферных факторов, например газов и пыли, загрязняющих нижние слои атмосферы.

Светостойкость — способность материала сохранять свои физико-химические свойства под действием световых лучей.

Химическая стойкость — способность материала сопротивляться воздействию кислот, щелочей, растворов солей и газов.

Не способны сопротивляться действию даже слабых кислот карбонатные природные каменные материалы — известняк, мрамор, доломит; нестойки к действию концентрированных щелочей битум. Наиболее стойкими материалами по отношению к действию кислот и щелочей являются керамические материалы и изделия, а также многие изделия на основе пластмасс.

Радиационная стойкость — свойство материала сохранять свои структуру и свойства после воздействия ионизирующих излучений. Для сравнительной оценки используется *толщина слоя половинного ослабления*, равная толщине слоя защитного материала, необходимой для ослабления интенсивности излучения в два раза.

Водостойкость — способность материалов сохранять необходимые прочностные свойства при действии воды. Водостойкость материала характеризуется *коэффициентом размягчения*.

Коэффициент размягчения — отношение прочности материала, насыщенного водой, к прочности сухого материала. Материалы, у которых коэффициент размягчения больше 0,75, называются *водостойкими*.

Огнестойкость — способность материалов сохранять необходимые эксплуатационные свойства при действии высоких температур, пламени и воды в условиях пожара в течение определенного времени. Она зависит от сгораемости материала, т.е. от его способности воспламеняться и гореть, и выражается произведением потерь массы Δm (мг) на путь распространения пламени s (мм), которое определяет степень сгорания от 0 (полностью сгораемые материалы) до 5 (негорючие материалы). Для измерения этой характеристики образец прикладывают к раскаленному стержню ($T = 1223$ К) на установленное время, а затем, загасив сухим способом пламя, определяют потерю массы Δm . Путь пламени s определяют как разность между исходной длиной образца и длиной его части, на которой не обнаружено обугливания, оплавления или разложения.

По огнестойкости материалы классифицируются на *несгораемые*, *трудносгораемые* и *сгораемые*.

Несгораемые материалы под действием огня или высокой температуры не горят и не обугливаются (сталь, бетон, кирпич и др.). Однако необходимо учитывать, что некоторые материалы при пожаре растрескиваются (гранит) или сильно деформируются (металлы) при температуре начиная с 600°C , поэтому конструкции из подобных материалов приходится защищать более огнестойкими материалами. Трудносгораемые материалы (асфальтобетон, фибролит, некоторые пенопласты и др.) под воздействием огня или высокой температуры тлеют, но после прекращения действия огня их горение и тление прекращаются. Сгораемые (как правило, органические) материалы горят открытым пламенем и продолжают гореть после удаления источника огня.

Жаростойкость — 1) для металлических материалов то же, что жароупорность, *окалиностойкость* — способность противостоять химическому разрушению поверхности под действием воздуха или другой окислительной газовой среды при высоких температурах; 2) для других конструкционных

материалов (например, бетона) — способность сохранять или лишь незначительно изменять механические свойства при высоких температурах.

Для чугунов, стекол и керамических изделий (главным образом огнеупорных) используется понятие *термостойкость*.

Термостойкость (термическая стойкость) — способность хрупких материалов противостоять, не разрушаясь, термическим напряжениям. Термостойкость определяется перепадом температур при закалке до комнатной температуры, при котором еще не наступает разрушение материала, или числом теплосмен (циклов нагрева и охлаждения), выдерживаемых образцом (изделием) до появления трещин.

Морозостойкость — свойство насыщенного водой материала выдерживать многократное число циклов попеременного замораживания и оттаивания без видимых признаков разрушения и без значительного понижения прочности. Морозостойкость материала количественно оценивается маркой по морозостойкости (например, F 50). За марку материала по морозостойкости принимают наибольшее число циклов попеременного замораживания и оттаивания, которое выдерживают образцы материала без снижения прочности на сжатие более 15%; образцы после испытаний не должны иметь видимых повреждений — трещин, выкрашивания (потеря массы не более 5%). От морозостойкости зависит долговечность строительных материалов в конструкциях, подвергающихся действию атмосферных факторов и воды.

Хладостойкость — способность высокополимерных материалов противостоять низким температурам. За хладостойкость принимается отрицательная температура, при которой после установленного времени выдержки на образцах материала появляются признаки механического разрушения (трещины и др.).

Красностойкость — способность сплава сохранять при нагреве до температур красного каления (обычно 600...650°C) высокую твердость и износостойкость. Повышенная красностойкость — характерное свойство инструментальных сталей.

Огнеупорность — способность некоторых материалов (главным образом огнеупоров) противостоять, не расплавляясь и не деформируясь, воздействию высоких температур (от 1580°C и выше). Материалы по степени огнеупорности подразделяют на *огнеупорные* (от 1580°C), *тугоплавкие* (1350...1580°C) и *легкоплавкие* (менее 1350°C).

Огнеупоры — материалы и изделия преимущественно из минерального сырья, обладающие огнеупорностью не ниже 1580°C. Различают изделия *огнеупорные* (огнеупорность 1580...1770°C), *высокоогнеупорные* (1770...2000°C) и *высшей огнеупорности* (свыше 2000°C). Применяются для кладки промышленных печей, получения и плавки металлов в металлургии (около 60% потребления огнеупоров), получения кокса, при обжиге цемента, в энергетических установках, топках и других теплотехнических агрегатах.

Для высокомолекулярных полимерных материалов определяется *теплостойкость*. **Теплостойкость** характеризуют температурой, при которой наступает еще допустимое для данного изделия изменение формы.

Потребительские свойства материалов второй группы позволяют дать оценку их работы в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации, т.е. с учетом различного рода механических воздействий на них, в том числе в агрессивных средах. Среди таких свойств — *релаксация напряжений, ползучесть, усталость, выносливость*. Большое значение имеют такие характеристики потребительских свойств, как *живучесть, длительная прочность, жаропрочность, истираемость и сохраняемость*.

Релаксация напряжений — процесс уменьшения во времени напряжений деформируемого материала в результате перехода упругой деформации в пластическую при условии постоянства общей деформации. Механизм релаксации может быть дислокационным, диффузионным и смешанным при совместном развитии процессов движения дислокаций и диффузии атомов. Релаксация напряжений наблюдается, например, в предварительно напряженной арматуре в период изготовления железобетонных конструкций.

Ползучесть — медленная непрерывная пластическая деформация материалов под действием постоянной нагрузки или механических напряжений. Под действием длительно приложенной нагрузки может развиваться значительная деформация, например, несущей конструкции, а иногда и ее разрушение.

Ползучести в той или иной мере подвержены все твердые тела — как кристаллические, так и аморфные, подвергнутые любому виду нагружения. Ползучесть может реализоваться от криогенных температур до температур, близких к температурам плавления. Так, в металлах наиболее сильный эффект ползучести наблюдается при температуре, равной $0,4 T_{пл}$. Поскольку деформация и ползучесть увеличиваются с возрастанием температуры, то их вредные последствия особенно проявляются при повышенных температурах. Механизм ползучести: скольжение дислокаций и направленная диффузия.

Ползучесть описывается *кривой ползучести* (рис. 35), которая представляет собой зависимость деформации от времени при постоянных температуре и приложенной нагрузке (или напряжении). Кривая ползучести имеет одинаковый вид для широкого круга материалов — металлов и сплавов,

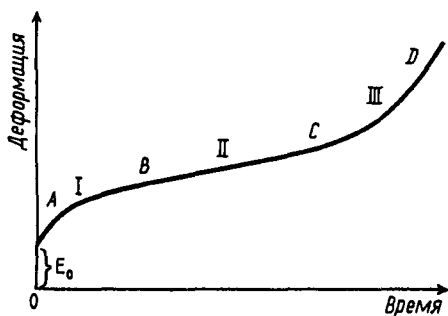


Рис. 35. Кривая ползучести:
AB — участок неуставившейся (или затухающей) ползучести (I стадия); *BC* — участок установившейся ползучести — деформации, идущей с постоянной скоростью (II стадия); *CD* — участок ускоренной ползучести (III стадия); E_0 — деформация в момент приложения нагрузки; точка *D* — момент разрушения

ионных кристаллов, полупроводников, полимеров, льда и других твердых тел.

Ползучесть характеризуется *пределом ползучести*, т.е. величиной длительно действующего напряжения, которое при данной температуре вызывает заданную скорость деформации. Величина заданной скорости деформации при определении предела ползучести определяется сроком службы изделия, который может колебаться в очень широком диапазоне. Пределы ползучести, определенные при разных температурах, позволяют конструктору иметь исходные данные для расчета деталей машин и установок, подверженных одновременному длительному воздействию напряжений и температур.

Усталость — процесс постепенного накопления повреждений под действием циклических напряжений, приводящий к уменьшению срока службы, образованию трещин и разрушению. *Предел усталости* — наибольшее напряжение, которое выдерживает материал без разрушения при повторении заранее заданного числа циклов переменных нагрузок. Частным случаем усталости является *коррозионная усталость*.

Коррозионная усталость — понижение предела выносливости металла или сплава при одновременном воздействии циклических переменных напряжений и коррозионной среды.

Выносливость — способность материала сопротивляться усталости. Выносливость определяется при длительном воздействии на материал циклических напряжений. Показателем выносливости является *предел выносливости*.

Предел выносливости σ_R — наибольшее значение максимального напряжения цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения после произвольно большого или заданного циклов нагружений. Предел выносливости определяют по числу циклов нагружений до полного разрушения материала или изделия.

Предел выносливости характеризует долговечность материала. Он зависит от состава, структуры и состояния поверхности материала, а также частоты циклов нагружений, температуры и других физико-химических особенностей окружающей среды.

Живучесть — время существования изделия от момента зарождения первой микроскопической трещины усталости размером 0,5—1,0 мм до окончательного разрушения. Живучесть характеризует надежность материала при циклическом нагружении.

Количественно живучесть изделия в конструкции оценивается *коэффициентом* $\beta = 1 - \tau_0/\tau_{\text{раз}}$, где τ_0 и $\tau_{\text{раз}}$ — соответственно продолжительность эксплуатации изделия до появления трещин и до разрушения, $\beta = 0,1 \dots 0,9$.

Длительная прочность — способность материала разрушаться не тотчас после приложения нагрузки, а по истечении некоторого времени. Явление длительной прочности позволяет использовать конструкционный материал в течение ограниченного (может быть, очень короткого, но достаточного для выполнения заданной функции) времени при больших нагрузках, существенно превышающих нагрузки, допустимые при длительной эксплуатации, а также определить время безопасного функционирования (*ресурса*) конструкции. *Предел длительной прочности* (ГОСТ 10145—81) — это наи-

большее напряжение, вызывающее разрушение материала за определенное время при постоянной температуре.

Жаропрочность — способность конструкционных материалов (главным образом металлических) выдерживать без существенных деформаций механические нагрузки при высоких температурах. Определяется комплексом свойств: сопротивлением ползучести, длительной прочностью и жаростойкостью.

Истираемость оценивают потерей первоначальной массы образца, отнесенной к площади поверхности истирания.

Сохраняемость — свойство материала сохранять обусловленные эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения и транспортирования, установленного технической документацией. Сохраняемость количественно оценивают временем хранения и транспортирования до возникновения несоответствия потребительским требованиям.

Потребительские свойства нередко находятся в противоречии с технологическими свойствами. Так, например, более прочные материалы менее технологичны, труднее обрабатываются при резании, холодной объемной штамповке, сварке и др. Решение при выборе материала обычно основывается на компромиссе потребительских и технологических требований.

1.10. Способы воздействия на свойства веществ и материалов

Требуемые свойства материалов, например повышение прочности металлов, в инженерной практике обеспечиваются созданием соответствующих химических композиций и применением различных способов обработки материалов.

Обработка материалов — действие, направленное на изменение свойств предмета труда при выполнении технологического процесса. К наиболее распространенным способам обработки относятся механическая и термическая обработки материалов.

1.10.1. Взаимосвязь химического состава со свойствами веществ и материалов

Понятие «*идеально чистое вещество*» имеет такой же абстрактный характер, как абсолютный нуль температуры или скорость света.

Идеально чистое вещество — физически и химически однородный элемент или химическое соединение, состоящие из определенного вида атомов или молекул и обладающие только им присущим комплексом постоянных свойств.

Чистые вещества — это такие, в которых содержание примесей находится на уровне 10^{-6} ... 10^{-7} % (по массе), а сумма остальных примесей менее 10^{-3} ... 10^{-4} % (по массе). Такие вещества входят в класс *особо чистых веществ* (ОСЧ).

В маркировку особо чистых веществ помимо наименования марки (ОСЧ) входят две цифры. Первая обозначает количество лимитируемых примесей, а вторая — показатель отрицательной степени их суммы, выраженной в процентах по массе. Например, ОСЧ-11-4 характеризует марку особо чистого вещества, в котором сумма одиннадцати лимитируемых примесей менее 10^{-4} % (по массе). Для особо чистых веществ, в которых ограничивают содержание примесей только органических веществ, марку ОСЧ дополняют буквами «оп» (органические примеси) с цифрой (через тире), обозначающей показатель отрицательной степени их суммы. Например, оп-3 ОСЧ характеризует марку особо чистого вещества, в котором суммарное содержание органических примесей менее 10^{-3} % (по массе). Наконец, если в особо чистом веществе ограничивают содержание примесей обеих групп, то маркировка его будет оп-3 ОСЧ-11-4, т.е. данное вещество содержит менее 10^{-3} % (по массе) органических примесей и сумма одиннадцати лимитируемых неорганических веществ не превышает 10^{-4} % (по массе).

Полупроводники, которые по уровню чистоты также могут быть отнесены к классу особо чистых веществ, благодаря специфике применения выделены в отдельный класс полупроводниковых веществ со своей классификацией и маркировкой.

Для жидкостей, применяемых при эксплуатации, изготовлении и ремонте машин, устройств и деталей машин (рабочие жидкости гидравлических систем привода и управления машин, смазочные масла, смазочно-охлаждающие жидкости, жидкие топлива, моющие растворы, растворители и др.) установлены классы чистоты (ГОСТ 17216—71) по числу частиц загрязнений в объеме жидкости: 00, 0, 1, ..., 16, 17.

Свойства чистых веществ уникальны и резко меняются при наличии уже небольшого количества примесей (рис. 36).

Один из главных путей создания материалов с заданными свойствами — это изменение химического состава. Однако до настоящего времени общих закономерностей, особенно для многокомпонентных систем, в целом не выявлено. Зависимость между химическим составом, структурой и характером диаграмм состояния впервые установил академик Н.С. Курнаков. Так, механические (например, твердость) и физические свойства сплавов, затвердевающих согласно диаграмме состояния без взаимной растворимости компонентов в твердом состоянии (рис. 37, а), изменяются по аддитивному закону. Физическая сущность **закона аддитивности** состоит в том, что вклад каждой фазы в величину свойства смеси определяется свойством этой фазы и ее долей в смеси.

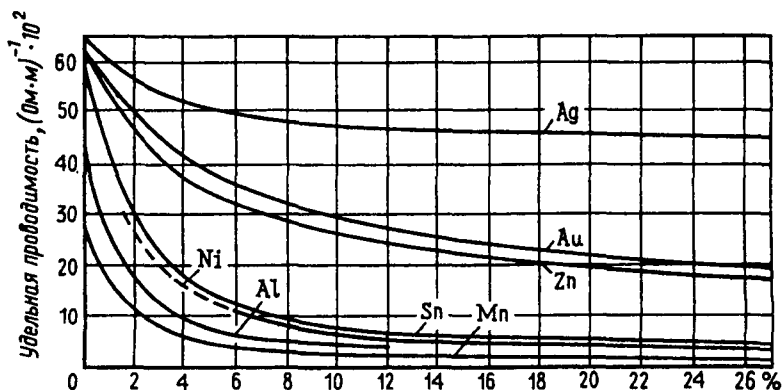


Рис. 36. Изменение электропроводности меди в зависимости от количества примесей

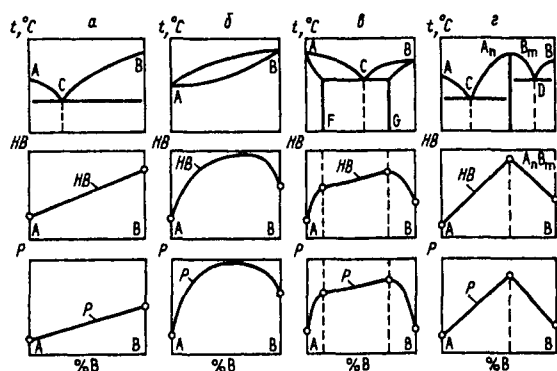


Рис. 37. Зависимость между типом диаграммы состояния сплавов и их свойствами:

а, б, в, г — типы диаграмм; HB — твердость; p — показатель физических свойств

Если в сплавах образуется непрерывный ряд твердых растворов, то свойства изменяются по криволинейной зависимости (рис. 37, б). В системе сплавов с ограниченной растворимостью компонентов (рис. 37, в) и в случае образования химического соединения (рис. 37, г) свойства изменяются в соответствии с принадлежностью той или иной части диаграммы к соответствующему типу.

1.10.2. Механическая обработка

1.10.2.1. Общие сведения

Изделия требуемых форм, размеров и свойств получают из различного рода сплавов, как правило, применяя механическую обработку.

Механическая обработка — обработка давлением или резанием.

Обработка давлением — обработка, заключающаяся в пластическом деформировании или разделении материала, причем разделение материала давлением происходит без образования стружки. Применяют как *объемную*, так и *поверхностную* обработку давлением. К объемным видам обработки давлением относятся *прокатка*, *волочение*, *штамповка*, *прессование* и *ковка*, а к поверхностным — *дробеструйный наклеп*, *накапывание стальным шариком*, *центробежно-шариковый наклеп*, *алмазное выглаживание* и др. Основная цель последней — упрочнение поверхности.

Прокатка — обжатие материала, в основном металла, между вращающимися валками с уменьшением исходного сечения заготовки, увеличением ее длины и формированием профиля, соответствующего форме валков, если последние негладкие. Способом прокатки получают большинство строительных изделий: балки, рельсы, листовую и прутковую сталь, арматуру, трубы.

Волочение — протягивание заготовки через отверстие, сечение которого меньше сечения заготовки.

Штамповка — выдавливание материала, при котором форма и размеры изделия определяются конфигурацией инструмента (штампа). Штамповка позволяет получить изделия очень точных размеров.

Прессование — выдавливание (экструдирование) материала из замкнутой полости контейнера через канал матрицы, форма и размеры которого определяют сечение прессуемого профиля. Прессование используется как способ обработки материалов давлением с целью их упрочнения и (или) производства изделий.

Ковка — штампованная деформация материала, в основном металла, под действием повторяющихся ударов молота или пресса.

Обработка резанием — обработка, заключающаяся в образовании новых поверхностей отделением поверхностных слоев материала с образованием стружки. Образование поверхностей сопровождается деформированием и разрушением поверхностных слоев.

1.10.2.2. Деформация поликристаллов

На всех стадиях деформирования поликристаллического вещества наблюдается смещение, в том числе остаточное, атомов от своих равновесных положений в кристаллической решетке. Это ведет к неупорядоченному изменению ее параметров (искажению). Отдельные атомы могут совсем уходить из узлов решетки в междоузлия, становясь межузельными (дислоцированными) и образуя вакансии, что ведет к росту числа точечных дефектов кристаллической решетки.

При относительно малых деформациях (~1%) атомная концентрация точечных дефектов достигает $10^{-5} \dots 10^{-4}$, что приводит к изменению ряда

физических свойств, например увеличению удельного электросопротивления; в то же время упрочнения материала еще не обнаруживается.

Для характеристики деформации используют понятие «*степень деформации*» ε , которую определяют по формуле:

$$\varepsilon = (F_0 - F_k)/F_0 \cdot 100\%, \quad (22)$$

где F_0 и F_k — площади сечения, соответственно, до и после деформации.

При увеличении степени деформации пластическая деформация поликристаллических веществ идет аналогично деформации монокристалла путем сдвига (скольжения) или двойникования, но формоизменение происходит в результате пластической деформации каждого отдельного зерна.

В каждом зерне плоскости и направления скольжения различно ориентированы по отношению друг к другу, и пластическая деформация возникает в наиболее благоприятно ориентированных по отношению к направлению воздействия зернах. Начинается перемещение дислокаций, вызывая сдвиг (скольжение) одних частей кристалла (зерна) относительно других вдоль определенных кристаллографических направлений, что приводит к удлинению зерен. При этом движущаяся дислокация не может переходить в соседнее зерно, так как в нем системы скольжения ориентированы иначе. Границы зерна тормозят движение дислокаций, но их скопление у границы создает напряжение и может упруго распространиться через границу, что приведет в действие источник возникновения дислокаций в соседнем зерне. Таким образом, происходит передача деформации от одного зерна другому.

В результате скольжения некоторых частей зерна (слоев) не только изменяется форма зерна, но в них измельчается блочная структура при увеличении угла разориентировки между блоками. Измельчение блочной структуры приводит к значительному увеличению числа дефектов кристаллической решетки (дислокаций, вакансий, межузельных атомов) и резкому возрастанию внутрикристаллитных и межкуристаллитных напряжений, а следовательно, к деформационному упрочнению (наклепу). Однако повышение плотности дефектов кристаллической решетки затрудняет движение отдельных дислокаций.

Деформационное упрочнение поликристаллических веществ, происходящее в процессе пластической деформации, значительно превосходит аналогичное в монокристаллах.

Деформационное воздействие на материал можно охарактеризовать по стадиям. Стадийность связана прежде всего с различным типом дефектных самоорганизующихся структур. Так, в эволюции дислокационных структур при деформации материалов с ОЦК-решеткой выявлены

Рис. 38. Трехстадийная кривая деформации в координатах «приведенное напряжение сдвига — деформация сдвига»:
 I — стадия легкого скольжения; II — стадия линейного упрочнения; III — стадия параболического упрочнения

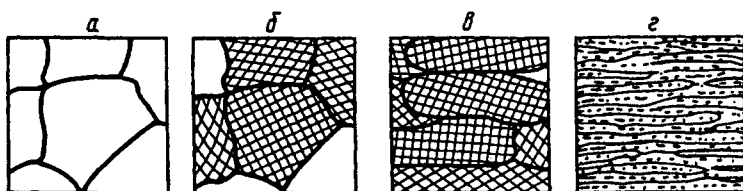
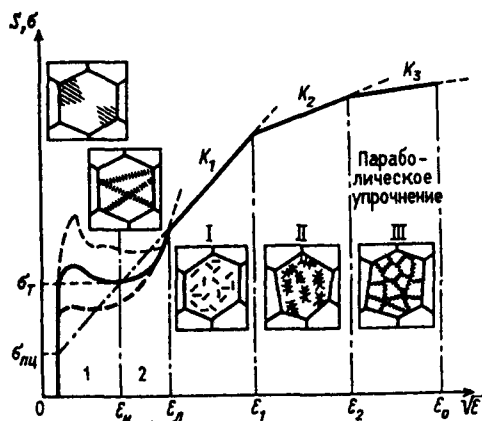


Рис. 39. Схемы изменения микроструктуры при объемной пластической деформации поликристалла:
 а — $\varepsilon = 0\%$; б — $\varepsilon = 1\%$; в — $\varepsilon = 40\%$; г — $\varepsilon = 80\%$

три стадии структурообразования (рис. 38): I — диполи из краевых дислокаций, винтовые дислокации и скопления дислокаций; II — клубки дислокаций, границы блочной структуры; III — блочная структура.

Металлы с ГЦК-решеткой упрочняются сильнее металлов с ОЦК-решеткой. Среди сплавов с ГЦК-решеткой сильнее упрочняются те, у которых энергия дефектов упаковки минимальна (например, аустенитная сталь).

При достаточно больших степенях деформации изменение формы зерна в результате смещения и поворотов его отдельных частей приводит к тому, что все зерна в поликристаллическом веществе, например металле, вытягиваются вдоль направления деформирования, образуя ориентированную структуру (рис. 39). Само зерно как целое при этом не поворачивается в пространстве, а лишь изменяет размеры, удлинняясь. Микроструктура, получаемая в результате такой ориентации, при степени деформации более 40% называется *текстурой деформации* (кристаллографической текстурой).

Текстура деформации — наличие преимущественной ориентации кристаллографических направлений и (или) плоскостей относительно направления деформации, приводящее к анизотропии свойств.

Характер текстуры зависит от кристаллического строения материала и вида деформации. При волочении, экструзии, вытяжке возникают так называемые *аксиальные текстуры* — у каждого кристалла определенное кристаллографическое направление оказывается параллельным направлению деформации. При прокатке получается более сложная текстура (*текстура прокатки*) — параллельно плоскости прокатки лежит определенная кристаллографическая плоскость, в которой вдоль направления прокатки ориентировано также определенное кристаллографическое направление.

Возникновение анизотропии физических свойств при образовании текстур деформации в поликристаллическом материале имеет большое практическое значение. Объемное пластическое деформирование, при котором создается магнитная текстура, используется, например, при производстве текстурованной электротехнической (трансформаторной) стали, сплавов для постоянных магнитов и др.

Магнитная текстура — преимущественная ориентация векторов спонтанной намагниченности доменов в ферро- и ферритмагнетиках в направлении, называемом осью магнитной текстуры; создается механической, а также термомеханической или термомагнитной обработкой, увеличивает магнитную анизотропию и улучшает другие магнитные свойства материалов.

При большой степени деформации кристаллическое вещество переходит из стабильного (исходного) состояния в метастабильное состояние. Структурные изменения, вызванные пластической деформацией, не являются устойчивыми и сохраняются только из-за малой подвижности атомов при низкой температуре. Температурное воздействие может восстановить структуру поликристаллических веществ такой, какой она была до деформации.

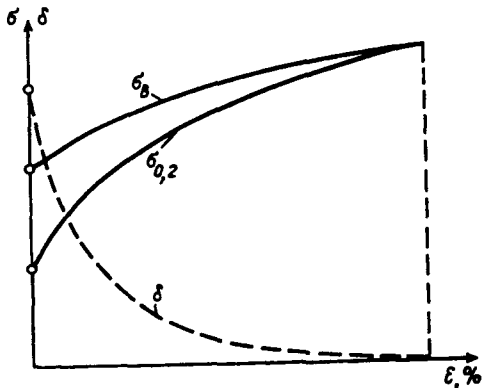
Деформационное упрочнение существенно влияет на величину физических свойств. Источником этого влияния являются 5...10% энергии, запасенной материалом из энергии, затраченной на деформирование. Так, объемная пластическая деформации приводит к увеличению твердости, удельного электросопротивления (максимально до 6%), коэрцитивной силы; возрастает склонность к коррозии, и, наоборот, снижаются плотность, магнитная проницаемость и величина остаточной индукции ферромагнитных материалов; поверхностная — повышает твердость, сопротивление коррозии.

При наклепе увеличиваются прочностные характеристики и понижаются пластичность и вязкость (рис. 40). С увеличением степени деформации предел текучести растет быстрее предела прочности. Обе характеристики у сильно наклепанных металлов сравниваются; такое состояние наклепанного металла является предельным — при попытке продолжить деформирование металл разрушается. Путем наклепа твер-

Рис. 40. Зависимость механических свойств металлов и сплавов от степени деформирования

дость и предел прочности удается повысить в 1,5—3 раза, а предел текучести при максимально возможных деформациях — в 3—7 раз.

Упрочнение поверхностных слоев изделий в технике (ГОСТ 18296—72) прежде всего ориентировано на повышение долговечности деталей машин и оборудования, поскольку их разрушение в большинстве случаев развивается с поверхности. Наклеп поверхностным пластическим деформированием при толщине упрочненного слоя 0,1...0,25 мм повышает предел выносливости на 30...50%, долговечность в 3—10 раз, сопротивление фреттинг-коррозии в 1,5—2 раза.



1.10.2.3. Деформация полимеров

Полимеры в высокоэластичном состоянии способны к большим обратимым изменениям формы при небольших нагрузках, так как их макромолекулы способны изгибаться. При этом макромолекулы в целом не перемещаются, но их отдельные сегменты (боковые группы) подвижны за счет их вращения в основной цепи вокруг связей. В частности, этим объясняются малая жесткость полимеров и их вязкоупругое поведение под нагрузкой, когда притяжение между молекулами преодолевается действием приложенных сил.

Для кристаллических полимеров (полиэтилен, полиамиды и др.) зависимость степени деформации от напряжения выражается линией, состоящей из трех участков (рис. 41).

Первоначально (участок I) удлинение прямо пропорционально усилию. По достижении некоторого усилия (точка А) удлинение полимера увеличивается при неизменном усилии (участок II). Это вызвано резким местным сужением образца, образованием «шей-

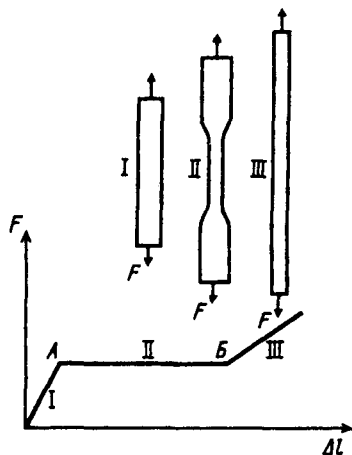


Рис. 41. Зависимость удлинения образца кристаллического полимера от усилия деформации

ки», распространяющейся на всю его длину. Затем наблюдается растяжение тонкого, но ориентированного образца вплоть до разрыва (участок III).

Деформация полимеров зависит также от скорости нагружения и температуры. При $T < T_{\text{ст}}$ деформационные кривые кристаллических и стеклообразных полимеров подобны. Полимеры с кристаллическим и стеклообразным строением могут быть ориентированы термомеханическим воздействием. При медленном растяжении таких полимеров, находящихся в высокоэластичном или вязкотекучем состоянии ($T > T_{\text{ст}}$), макромолекулы и элементы надмолекулярных структур могут ориентироваться в силовом поле, приобретая упорядоченную структуру (текстуру). Различают *одно-*(волокна) и *многоосную* (пленки) *ориентации*.

В процессе ориентации возрастает межмолекулярное взаимодействие, что приводит к повышению $T_{\text{ст}}$, снижению T_g и особенно к повышению (в 2—5 раз в направлении ориентации) прочности при сохранении достаточной упругости. Свойства материала становятся анизотропными.

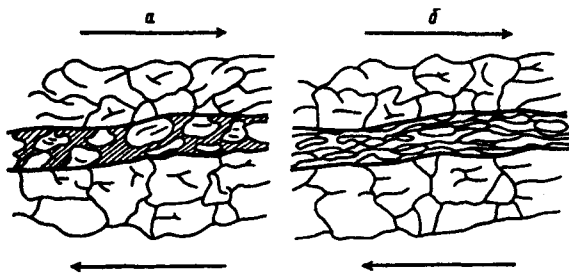
1.10.2.4. Деформация аморфных сплавов

Поведение аморфных сплавов при деформации, как и кристаллических материалов, зависит от процессов, протекающих на микроуровне. Однако отсутствие дальнего порядка исключает протекание пластической деформации путем движения дислокаций, так как в структуре аморфных сплавов отсутствуют кристаллографические плоскости скольжения. В связи с этим для описания механизмов скольжения эффективны модели аморфных сплавов, предполагающие их поликластерное строение. В соответствии с этими моделями аморфные твердые тела образованы кластерами, имеющими произвольную форму и случайную упаковку, но сохраняющими достаточно большую общность.

Предполагается, что границы кластеров обладают тем же атомным строением, что и слои скольжения в кристаллических веществах. Однако в силу случайной упаковки кластеров и их произвольной формы сквозная межкластерная граница отсутствует. Поэтому скольжение путем движения дислокаций происходит не гомогенно, а вдоль тех участков кластерных границ, где касательные напряжения достигают критического уровня (при этом разрывы происходят в местах концентрации, нормальных к границе растягивающих напряжений).

Негомогенная пластическая деформация аморфных сплавов сопровождается микроразрушениями (при гомогенной деформации весь образец деформируется пластически). Структура полосы скольжения в этом случае имеет вид, представленный на рис. 42, где жирными линиями выделены края этой полосы, а межкластерные участки заштрихованы.

Рис. 42. Структура полосы негетерогенного скольжения на начальной (а) и конечной (б) стадиях пластической деформации аморфных сплавов



Основными параметрами пластического течения аморфного сплава являются *скорость движения полосы скольжения* и *предел текучести*. На микроуровне прочность аморфных сплавов, как и в случае кристаллических тел, определяется модулями упругости.

1.10.3. Термическая обработка

Термическая обработка — это обработка, заключающаяся в изменении структуры и свойств материала заготовки вследствие тепловых воздействий.

Основные параметры термической обработки: *температура нагрева*, *скорость нагрева*, *продолжительность выдержки при температуре нагрева* и *скорость охлаждения*.

Выбор температуры нагрева сплава при конкретном виде термической обработки определяется температурами фазовых превращений (например, критическими температурами на соответствующей диаграмме состояния). Температура нагрева не должна превышать температуру плавления (линию солидус на диаграмме состояния).

Поскольку при нагреве и охлаждении сплавов с реальными скоростями фазовые превращения в твердом состоянии протекают со значительным тепловым гистерезисом, следует отличать критические температуры при нагреве сплава от аналогичных температур при его охлаждении.

Скорость нагрева выбирается в зависимости от ряда факторов: теплопроводности материала, формы и размеров изделий, общей массы нагреваемых изделий, характера их расположения в печи и некоторых других.

Продолжительность выдержки при заданной температуре нагрева определяется скоростью фазовых превращений. Выдержка необходима для полного завершения фазовых превращений и выравнивания температуры по всему объему изделия.

Скорость охлаждения выбирается в зависимости от степени устойчивости фиксируемой фазы при данном химическом составе, а также от требуемых структуры и свойств.

Основными видами термической обработки являются *отжиг*, *закалка*, *отпуск* и *искусственное старение*. Разновидности термической обработки — *термомагнитная* и *электротермическая* обработки, *обработка холодом* и др.

Термомагнитная обработка — разновидность термической обработки, позволяющая улучшить некоторые магнитные свойства материалов в результате охлаждения изделий из них в магнитном поле.

Электротермическая обработка — разновидность термической обработки материалов с использованием электрического нагрева (индукционного, контактного и др.). Позволяет использовать большие скорости нагрева, а также нагревать отдельные участки изделия либо только его поверхностный слой.

Термической обработке для перевода изделий в более стабильное состояние после механической обработки подвергают слитки, отливки, полуфабрикаты, а также сварные соединения, детали машин и инструменты.

Упрочнению термической обработкой подвергаются до 8...10% общей выплавки стали в стране. Номенклатура упрочняемых деталей велика — от деталей приборов, разнообразных деталей машин до крупных элементов металлургического, тракторного, энергетического оборудования.

1.10.3.1. Отжиг

Отжиг — термическая обработка материалов (например, металлов, полупроводников, стекол), заключающаяся в нагреве до определенной температуры, выдержке и медленном охлаждении (3...200°С/ч). Цель отжига — улучшение структуры и обрабатываемости материалов, снятие внутренних напряжений и др. Микроструктура материалов в результате отжига становится равновесной.

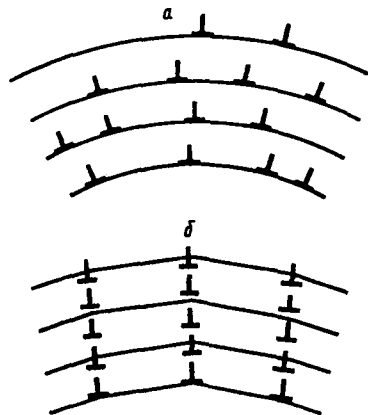
Отжиг для металлов и сплавов в зависимости от температуры нагрева имеет разновидности: *возврат* и *рекристаллизационный отжиг*.

Возврат — нагрев деформированных металлов и сплавов ниже температуры их рекристаллизации ($\sim 0,2 T_{пл}$), выдержка и медленное охлаждение (с печью) для частичного восстановления их структурного совершенства в результате уменьшения плотности дефектов строения, однако без заметных визуальных изменений микроструктуры. Возврат обусловлен микроструктурными изменениями внутри каждого зерна. Возврат включает две стадии — *отдых* и *полигонизацию*.

Отдых — начальная стадия процесса возврата деформированного металла, протекающая при низкотемпературном (до $0,2 T_{пл}$) нагреве и объединяющая процессы, связанные с диффузионным перераспределением точечных дефектов (сток к границам зерен и дислокациям) и их частичной аннигиляцией (взаимным уничтожением). При отдыхе также

Рис. 43. Схема полигонизации:

а — распределение дислокаций после деформации;
б — образование внутризеренных блоков



происходит перегруппировка дислокаций без образования новых блоков внутри зерен. Отдых используют для устранения внутри отдельных зерен или в объеме сплава неоднородности химического состава, возникающей чаще всего в процессе кристаллизации, а также для частичной релаксации напряжений.

Полигонизация — стадия процесса возврата деформированного металла, протекающая при нагреве до $(0,3...0,4)T_{пл}$ и связанная с разделением деформированных зерен на полигоны (блоки, субзерна) с малой плотностью дислокаций. Границы полигонов (стенки, субграницы) образуются при энергетически выгодном выстраивании дислокаций в результате их диффузионного движения, а также их частичной аннигиляции (рис. 43).

Полигонизация приводит к дальнейшему снятию упругих искажений (внутренних напряжений) кристаллической решетки и более полному восстановлению физических свойств. Механические свойства при этом изменяются незначительно (происходит снижение прочности). Текстура сохраняется, хотя и становится блочной.

Полигонизация после больших деформаций, как правило, является начальной стадией *рекристаллизации*.

Рекристаллизация — процесс зарождения новых кристаллических зерен в поликристалле и их роста за счет имевшихся ранее. Ее можно представить в виде стадий: *первичная рекристаллизация* (рекристаллизация обработки), *собирательная* и *вторичная рекристаллизации*. Для того чтобы в металле протекала рекристаллизация, необходима его хотя бы минимальная предварительная холодная обработка, обеспечивающая *критическую степень деформации*.

Первичная рекристаллизация — процесс зарождения и роста новых равноосных зерен при нагреве до полного исчезновения текстуры, созданной деформацией. Температура начала первичной рекристаллизации (*температурный порог рекристаллизации*) меняется от $0,1...0,2 T_{пл}$ для чистых металлов до $0,5...0,6 T_{пл}$ для твердых растворов. Зародышами новых зерен являются отдельные энергетически выгодные блоки (центры рекристаллизации).

После исчезновения текстуры в процессе первичной рекристаллизации металл приобретает равноосную мелкозернистую структуру. Наклеп практически полностью снимается, и свойства материала приближаются к их исходным значениям. Разупрочнение объясняется снятием искажения кристаллической решетки и резким уменьшением плотности дислокаций. Свойства металлов и сплавов после первичной рекристаллизации близки к свойствам после их отжига.

Для полного снятия наклепа металлы нагревают до более высоких температур, чтобы обеспечить высокую скорость рекристаллизации и полноту ее протекания. Такая термическая обработка получила название *рекристаллизационного отжига*.

Рекристаллизационный отжиг — нагрев деформированных металлов и сплавов до температур более $0,4 T_{пл}$ для технически чистых металлов и $0,5...0,6 T_{пл}$ — для сплавов (твердых растворов), выдержка и медленное охлаждение (с печью) для улучшения структуры и обрабатываемости, снятия внутренних напряжений, управления формой и размерами зерен, текстурой и свойствами металлов. Разновидностью рекристаллизационного отжига является *нормализация*.

Нормализация (*нормализационный отжиг*) — вид термической обработки, заключающийся в нагреве деформированных металлов и сплавов до температур выше температурного порога рекристаллизации, выдержке и охлаждении на воздухе для придания металлу однородной мелкозернистой структуры, что обеспечивает повышение пластичности и ударной вязкости.

Собирательная рекристаллизация — процесс роста одних равноосных зерен за счет исчезновения других путем фронтального перемещения граничных зон растущих зерен и поглощения при этом мелких. Собирательная рекристаллизация происходит после завершения первичной рекристаллизации в процессе последующего нагрева. Структура материала в результате такого процесса характеризуется увеличением размеров зерен при уменьшении их числа.

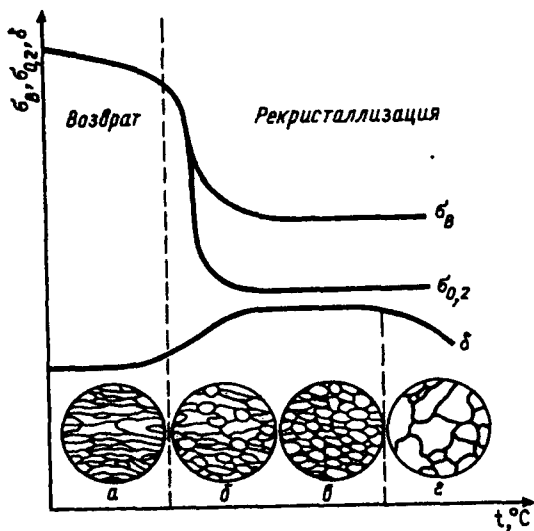
Вторичная рекристаллизация — процесс ускоренного роста отдельных зерен, приводящий структуру материала к разнотекстурности. Зерна, растущие с большей скоростью, можно условно рассматривать как зародышевые центры. В результате вторичной рекристаллизации образуется разнотекстурная структура, которая представляет собой множество мелких зерен и небольшое число очень крупных зерен. Вторичная рекристаллизация приводит к ухудшению механических свойств металлов.

При вторичной рекристаллизации после высоких степеней предшествующей деформации нередко возникает *текстура рекристаллизации*. Характер текстуры рекристаллизации определяется видом предшествующей обработки давлением (прокатка, волочение и др.), условиями про-

Рис. 44. Влияние нагрева при отжиге на изменение структуры деформационно-упрочненного металла (а, б, в, г) и величину его механических свойств

ведения отжига, а также количеством и природой примесей. Текстуру рекристаллизации можно наблюдать в меди, алюминии, железе и других металлах. При образовании текстуры рекристаллизации отожженный поликристаллический металл характеризуется анизотропией свойств.

Влияние нагрева при отжиге на микроструктуру деформационно-упрочненного металла и величину механических свойств (пластичности, прочности) схематически представлено на рис. 44.



1.10.3.2. Закалка

Закалка — это термическая обработка материалов, заключающаяся в нагреве и последующем быстром охлаждении с целью фиксации высокотемпературного состояния материала или предотвращения (подавления) нежелательных процессов, происходящих при медленном охлаждении. В результате закалки, как правило, образуется неравновесная структура. Разновидность закалки — *поверхностная закалка*.

Температурный режим закалки включает:

- 1) нагрев сплава до температуры фазового превращения;
- 2) быстрое охлаждение (*охлаждающие среды* — вода, масло, расплавленные соли, свинец, воздух и др.).

Область применения закалки — материалы (в основном сплавы), имеющие превращения в твердом состоянии (переменная растворимость, полиморфные превращения твердых растворов, распад высокотемпературного твердого раствора по эвтектической реакции и др.).

Рассмотрим закалку для металлических сплавов с переменной растворимостью компонентов в твердом состоянии (рис. 45). Для состава «с» температурой закалки будет t' — температура на 30...50°C выше критической линии. Быстрым охлаждением от температуры закалки полностью подавляют выделение вторичных кристаллов и в результате получают однофазный сплав, представляющий собой пересыщенный компонентом В твердый раствор. Структура такого сплава — неравновесная (рис. 46).

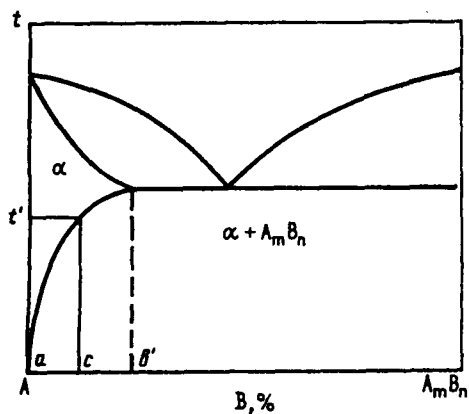


Рис. 45. Диаграмма состояния компонентов с переменной растворимостью в твердом состоянии

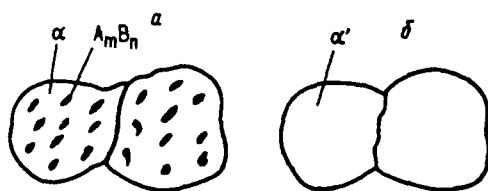


Рис. 46. Схематическое изображение структуры:
а — сплава в равновесном состоянии; б — закаленного сплава

Закалка неорганических стекол заключается в их нагреве до температуры выше $T_{ст}$ и последующем быстром и равномерном охлаждении в потоке воздуха или масла.

Закалка существенно влияет на физические свойства. Так, в сплавах она изменяет структурно-чувствительные физические и химические свойства: увеличиваются прочность, хрупкость, удельное электросопротивление, коэрцитивная сила, возрастает коррозионная стойкость. Особенно сильно упрочняются сплавы, претерпевающие в равновесных условиях эвтектическое превращение. Прочность возрастает либо вследствие мартенситного механизма фазового превращения, либо вследствие понижения температуры эвтектической реакции, приводящего к измельчению кристаллов фаз, образующих эвтектическую смесь.

Поверхностная закалка изделий, в отличие от объемной, позволяет упрочнять только поверхностный слой на определенную глубину. Ее можно проводить двумя способами. По первому способу нагревают только поверхностный слой, который затем закалывают при охлаждении. При втором способе нагревают все изделие, но при закалке охлаждают только поверхностный слой со скоростью больше критической.

1.10.3.3. Отпуск и искусственное старение

Термин «отпуск» обычно используют применительно к сталям и другим сплавам, испытывающим при закалке полиморфное превращение (двухфазные алюминиевые бронзы, некоторые сплавы на основе титана и др.). Термин «старение» чаще всего используют применительно к сплавам, не претерпевающим при закалке полиморфного превращения (сплавы на основе алюминия, аустенитные стали, никелевые сплавы и др.).

Отпуск и искусственное старение металлов — термическая обработка закаленных сплавов (главным образом сталей), включающая нагрев (ниже $0,4 T_{пл}$), выдержку и охлаждение. Скорость охлаждения не влияет на структуру и свойства сплавов. Цель — достижение оптимального сочетания прочности, пластичности и ударной вязкости.

В предварительно закаленных сплавах нагрев при отпуске и искусственном старении вызывает процессы распада пересыщенного твердого раствора (метастабильной фазы), в результате которых происходят фазовые превращения.

Механизм распада пересыщенного твердого раствора заключается в следующем. На первой стадии внутри такого раствора происходит направленная диффузия атомов пересыщающего компонента и скопление их в определенных участках кристаллической решетки. На второй стадии в этих участках формируются очень малые области с новой кристаллической решеткой, сопряженной (когерентной) с кристаллическими решетками основного металла и пересыщающего компонента. На третьей стадии происходят отрыв одной решетки от другой и образование дисперсных частиц новой фазы. На четвертой стадии происходят *коагуляция* дисперсных частиц и переход метастабильной модификации новой фазы в стабильную модификацию. Выделение этой фазы возможно по всей кристаллической решетке на ее дефектах, ускоряющих процесс образования зародышей фазы. Границы зерен являются наиболее благоприятными местами для возникновения аномальной концентрации диффундирующих атомов.

Коагуляция — укрупнение (слипание) частиц при их столкновении в процессах броуновского движения, перемешивания или диффузии в силовом (например, температурном или электрическом) поле.

Микроструктура сплавов, прошедших отпуск или искусственное старение, содержит выделения новой фазы, образовавшиеся за счет пересыщающего компонента в твердом растворе. Тип выделений (кристаллическая решетка), их размер и характер сопряженности с решеткой твердого раствора зависят как от природы сплава, так и от условий старения, т.е. от температуры нагрева и времени выдержки при этой температуре. С увеличением времени выдержки сплава при нагреве выделения новой фазы растут (коагуляция) и превращаются в сферические (*сфероидизация*).

Появление субмикроскопической неоднородности при диффузии пересыщающего компонента, когерентная связь двух различных решеток, выпадение дисперсных частиц приводят к упрочнению сплава (*дисперсионному упрочнению*), увеличению его твердости, повышению сопротивления пластической деформации и коррозии. Но обеднение

твердого раствора пересыщающим компонентом, потеря когерентности решеток новой фазы и твердого раствора, коагуляция и сфероидизация частиц новой фазы сопровождаются разупрочнением сплава, повышением его пластичности и изменением электрического сопротивления.

Отпуск и искусственное старение в 2—3 раза повышают такие свойства сплавов, как твердость, прочность, коэрцитивная сила, удельное электрическое сопротивление и др.

1.10.4. Термомеханическая обработка

Термомеханическая обработка — совокупность операций деформации, нагрева и охлаждения, в результате которых формирование окончательной структуры и свойств материала происходит в условиях повышенной плотности и оптимального распределения несовершенств строения, созданных пластической деформацией. Характер воздействия термомеханической обработки на строение, структуру и свойства материалов, как правило, интерпретируют по *термомеханическим кривым*.

Термомеханическая кривая — графическое изображение изменения характеристик деформации при изменении температуры.

Термомеханическая обработка металлов и сплавов. В зависимости от соотношения температуры, при которой осуществляют деформацию, и температуры рекристаллизации металла различают *холодную и горячую деформации (обработки)*.

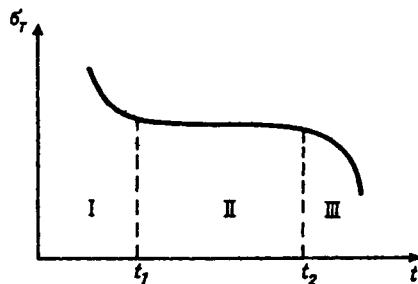
Холодной деформацией называют такую, которую проводят при температурах ниже температуры рекристаллизации ($0,15...0,2 T_{пл}$). Холодная пластическая деформация характеризуется непрерывным возрастанием плотности дислокаций, что обеспечивает создание наклепа и текстуры.

При горячей ($0,7...0,75 T_{пл}$) обработке давлением одновременно с пластической деформацией протекает рекристаллизация, которая продолжается и после деформации до остывания материала ниже температуры рекристаллизации. Процессы полигонизации и рекристаллизации, происходящие одновременно с деформацией, называют динамическими, так как их эффекты, связанные с разупрочнением, непрерывно чередуются с упрочнением, вызываемым горячим наклепом.

Применение горячей обработки давлением позволяет в значительной степени подавить процессы рекристаллизации, приводящие к разупрочнению, что объясняется измельчением зерна, сохранением полугорячего наклепа и высокодисперсным ориентированным распадом твердого раствора.

Горячая обработка давлением (прокатка, прессование, ковка, штамповка и др.) широко используется в технике, например при производстве листового проката и горячекатаного полуфабриката различного профиля.

Рис. 47. Термомеханическая кривая зависимости предела текучести аморфных сплавов (t_1 , t_2 — критические температуры)



Термомеханическая обработка аморфных сплавов. Термомеханическая кривая зависимости предела текучести аморфного сплава характеризуется наличием трех характерных областей (рис. 47): I — резкое уменьшение предела текучести; II — инвариантность; III — плавное уменьшение предела текучести.

Наличие плато инвариантности можно представить как результат развития двух процессов: упругой (гомогенной) деформации всего объема образца и локализации деформации в полосах скольжения (негомогенное скольжение). Такое течение нечувствительно к скорости деформации и температуре воздействия и характеризуется отсутствием стадии упрочнения.

Таким образом, инвариантный интервал определяет рабочую температурную область аморфного сплава, когда подводимая энергия (в виде температуры и напряжения) недостаточна для нарушения его строения.

Термомеханическая обработка полимерных материалов. Термомеханические кривые для полимерных материалов с различным строением приведены на рис. 48. По этим кривым можно судить о характере изменения механических и технологических свойств полимеров при различных температурах. Так, полимеры или пластмассы на их основе эксплуатируются при температурах ниже температуры стеклования $t_{ст}$, когда они находятся в твердом состоянии.

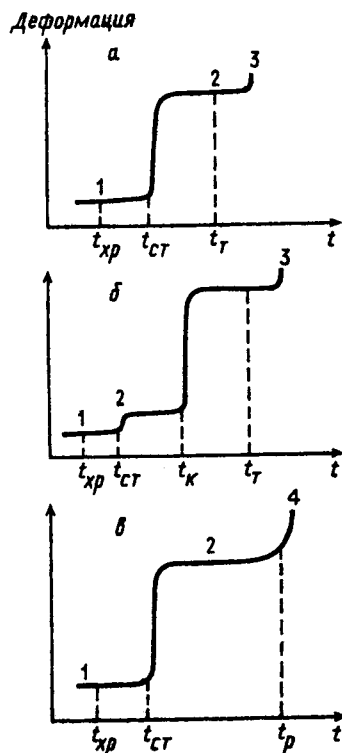


Рис. 48. Термомеханические кривые для полимеров: а — аморфного; б — кристаллического; в — редкосетчатого. Выделены области состояний полимеров: 1 — стеклообразное; 2 — высокоэластичное; 3 — вязкотекучее; 4 — химическое разложение

Температура $t_{\text{хр}}$ (ниже $t_{\text{ст}}$) соответствует переходу полимеров в хрупкое состояние (для полистирола $t_{\text{ст}} = 100^\circ\text{C}$ и $t_{\text{хр}} = 90^\circ\text{C}$; для полиметилметакрилата $t_{\text{ст}} = 100^\circ\text{C}$ и $t_{\text{хр}} = 10^\circ\text{C}$).

Кристаллические полимеры (рис. 48, б) ниже температуры кристаллизации $t_{\text{к}}$ являются твердыми, но имеют различную жесткость в зависимости от степени кристалличности. Выше температуры $t_{\text{к}}$ их кристаллическая часть плавится, и далее, в диапазоне температур от $t_{\text{к}}$ до $t_{\text{пл}}$, полимер находится в высокоэластичном состоянии.

Кристаллические и аморфные полимеры при температуре свыше $t_{\text{ст}}$ переходят в вязкотекучее состояние. Формование изделий из полимеров или пластмасс осуществляют в области их вязкотекучего состояния.

В редкосетчатых полимерах (типа резин) узлы сетки препятствуют относительному перемещению полимерных цепей. Поэтому при повышении температуры (рис. 48, в) в таких полимерах не наступает вязкого течения, а область высокоэластичного состояния расширяется, и ее верхней границей становится температура химического разложения полимера $t_{\text{р}}$.

1.10.5. Химико-термическая обработка

Химико-термическая обработка (поверхностное легирование) — термическая обработка материалов (в основном металлов и сплавов) в химически активных средах для изменения химического состава, структуры и свойств в поверхностных слоях.

Механизм химико-термической обработки металлов и сплавов включает:

- 1) образование в окружающей среде (или в отдельном реакционном объеме) высокой концентрации диффундирующего элемента в атомарном (ионизированном) состоянии;
- 2) адсорбцию атомов (ионов) поверхностью металла с образованием химических связей между ионами насыщающего элемента и основного вещества;
- 3) диффузию адсорбированных атомов от поверхности в глубь обрабатываемого материала.

В результате диффузии образуется диффузионный слой, т.е. слой материала у поверхности насыщения, отличающийся от исходного по химическому составу, структуре и свойствам.

Концентрация диффундирующего элемента уменьшается от поверхности в глубь металла. При этом диффузионный слой образуется в той же последовательности, что и однофазные области на диаграмме состояний при температуре, равной температуре насыщения (рис. 49). Двухфазные области в диффузионной зоне могут образоваться только при

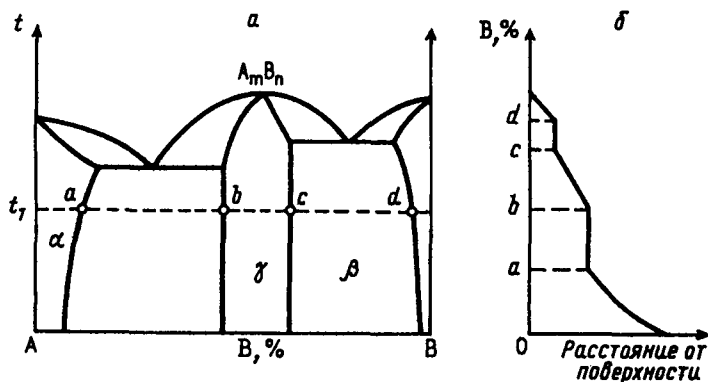


Рис. 49. Схема распределения диффундирующего элемента в слое при ограниченной растворимости в твердом состоянии и наличии в системе промежуточной фазы: *a* — диаграмма состояния металла *A* и диффундирующего элемента *B*; *б* — распределение элемента *B* в слое; t_1 — температура процесса насыщения

многокомпонентном насыщении, так как в противном случае через фазу постоянного состава диффузионный перенос невозможен из-за отсутствия градиента концентрации.

Если при температуре насыщения имеется значительная растворимость или неограниченная растворимость в твердом состоянии, то концентрация растворенного компонента будет монотонно уменьшаться от поверхности вглубь. Если при температуре процесса могут возникать химические соединения или промежуточные фазы переменного состава, то концентрация растворенного компонента по глубине слоя будет изменяться скачками.

При охлаждении от температуры насыщения фазовый состав диффузионного слоя и его структура не изменяются, если в системе «исходный материал — диффундирующий компонент» нет превращений в твердом состоянии. Если в твердом состоянии имеют место фазовые превращения, то каждый участок диффузионного слоя будет претерпевать те или иные превращения в зависимости от состава и характера взаимодействия компонентов.

Для оценки процесса химико-термической обработки используется понятие «эффективная толщина диффузионного слоя».

Эффективная толщина диффузионного слоя — часть общей толщины диффузионного слоя, определяемая кратчайшим расстоянием от поверхности насыщения до мерного участка, характеризуемого установленным предельным номинальным значением базового параметра, как правило определенным значением твердости.

Эффективная толщина зависит от температуры насыщения, продолжительности процесса, характера образующихся фаз, состава обрабаты-

ваемого материала и концентрации диффундирующего элемента на поверхности.

Химико-термическая обработка наиболее результативна в случае, когда диффундирующий элемент и исходный материал взаимодействуют, образуя твердые растворы или химические соединения. Чтобы судить о фазовом составе полученных диффузионных слоев, как правило, рассматривают изотермический разрез соответствующей диаграммы состояния сплавов при температуре химико-термической обработки.

Химико-термическую обработку металлов и сплавов классифицируют *по диффундирующему веществу и по способу диффузионного насыщения*.

По диффундирующему веществу различают такие виды насыщения, как:

цементация — углеродом;

нитроцементация — углеродом и азотом одновременно;

азотирование — азотом;

борирование — бором в определенных средах;

силицирование — кремнием;

алитирование — алюминием;

хромирование — хромом.

Способами диффузионного насыщения являются: погружение в расплав, насыщение из расплавленных солей (с электролизом или без него), насыщение из сублимированной фазы (путем испарения или из газовой фазы).

Химико-термическая обработка получила достаточно широкое распространение для упрочнения неорганических стекол. Неорганические стекла при такой обработке подвергаются закалке в подогретых кремнийорганических жидкостях, в результате чего на поверхности изделия образуются полимерные пленки; этим создается дополнительное по сравнению с результатом обычной закалки упрочнение.

1.11. Общие требования безопасности при использовании или применении веществ и материалов

Отсутствие необходимой информации об опасных свойствах химических веществ и материалов и, как следствие, неправильное обращение с ними — одна из причин возникновения ситуаций, приводящих к последствиям, связанным с ущербом для жизни, здоровья людей и окружающей среды.

По степени воздействия на организм вредные вещества, содержащиеся в сырье, продуктах, полупродуктах и отходах производства, подразделяют (ГОСТ 12.1.007—76) на четыре класса опасности:

- 1) *чрезвычайно опасные;*
- 2) *высокоопасные;*
- 3) *умеренно опасные;*
- 4) *малоопасные.*

Класс опасности вредных веществ устанавливают в зависимости от норм и показателей. Отнесение вредного вещества к классу опасности производят по показателю, значение которого соответствует наиболее высокому классу опасности.

Для осуществления мероприятий по обеспечению безопасного обращения опасных веществ и материалов необходима информация об их свойствах, мерах защиты от вредных воздействий, условиях хранения и др. Основными носителями этой информации в большинстве развитых стран являются предупредительная маркировка и информационные документы о безопасности вещества (материала).

Российские требования к информационным документам о безопасности веществ (материалов) содержатся в ГОСТ Р 50587—93 *«Паспорт безопасности вещества (материала). Основные положения. Информация по обеспечению безопасности при производстве, применении, хранении, транспортировании, утилизации»*.

Паспорт безопасности является обязательной составной частью технической документации на вещество (материал), а также на отходы промышленного производства. Он предназначен для доведения до потребителя достоверной информации по безопасности промышленного применения, хранения, транспортирования и утилизации веществ и материалов, а также их использования в бытовых целях.

Головной организацией по разработке и регистрации паспортов безопасности является Всероссийский научно-исследовательский центр стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ (ВНИЦ СМВ) Госстандарта России. Составляет паспорт безопасности и несет ответственность за полноту и достоверность информации в нем организация (юридическое лицо), изготавливающее и поставляющее вещество (материал) на рынок. Эта организация обязана бесплатно обеспечить потребителя паспортом безопасности.

Паспорт безопасности должен содержать следующие разделы:

- наименование и состав вещества или материала, сведения об организации (лице) — производителе или поставщике;
- виды опасного воздействия и условия их возникновения;
- меры первой помощи;
- меры и средства обеспечения пожарной безопасности;
- меры по предотвращению чрезвычайных ситуаций;
- правила обращения и хранения;
- правила и меры по обеспечению безопасности пользователя;

- физические и химические свойства;
- стабильность химической активности;
- токсичность;
- воздействие на окружающую среду;
- утилизация и захоронение отходов (остатков);
- правила транспортирования;
- информация о международном и национальном законодательстве;
- дополнительная информация.

В соответствии с ГОСТ Р 51121—97 «Товары непродовольственные. Информация для потребителя. Общие требования» требования безопасности при хранении, транспортировании, использовании, утилизации, захоронении, уничтожении товаров должны быть выделены из остальной информации другим шрифтом, цветом или иным способом.

Международные требования к информационным документам о безопасности веществ (материалов) регламентируются Конвенцией и Рекомендацией о безопасности при использовании химических веществ на производстве (1990) и стандартом ИСО 11014 «Таблица данных о безопасности химических веществ. Содержание и порядок разделов».

Из Конвенции 1990 г. о безопасности при использовании химических веществ на производстве и Рекомендации о безопасности при использовании химических веществ на производстве:

1. Все химические вещества маркируются таким образом, чтобы давалась основная информация об их характере. Маркировка химических веществ обеспечивается их поставщиками, будь то производители, импортеры или оптовики.

2. Опасные химические вещества маркируются дополнительно таким образом, чтобы информация о них легко понималась трудящимися и чтобы давалась основная информация относительно их классификации, представляемой ими опасности и мер предосторожности, которые следует предпринимать. Этикетка должна быть легкопонижаемой для трудящихся. Если химическое вещество невозможно промаркировать ввиду размеров контейнера или характеров упаковки, то должны применяться другие средства идентификации, например, такие, как ярлыки или сопроводительные документы.

3. Требования к маркировке химических веществ в соответствии с вышеуказанными пунктами определяются компетентным органом в соответствии с национальными и международными нормами.

4. Требования к предупредительной маркировке опасных химических веществ должны в соответствии с существующими национальными и международными системами охватывать:

а) информацию, которая должна содержаться на этикетке, включая в случае необходимости торговые наименования, характеристику химического вещества, имя, адрес и номер телефона поставщика, символы опасности, характер особых рисков, связанных с использованием веществ, указания по

мерам предосторожности, идентификацию партии товара, указание, что карта данных по безопасности химических веществ (в России — паспорт безопасности вещества (материала)), содержащая дополнительную информацию, находится у предпринимателя, классификацию по системе, установленной компетентным органом;

б) удобочитаемость, долговечность и размер этикетки;

в) единообразие этикеток и символов, включая цвет.

Для обеспечения информационной базы по безопасному обращению веществ на международном уровне в рамках Международной программы химической безопасности реализуется проект создания Международных карт по химической безопасности (ICSC), основное назначение которых — нести информацию об опасностях, представляемых веществом (материалом) для людей и окружающей среды.

Металлы — простые вещества, обладающие в обычных условиях характерными свойствами: высокой электро- и теплопроводностью, отрицательным температурным коэффициентом электропроводности, способностью хорошо отражать электромагнитные волны (блеск и непрозрачность), высокой прочностью и пластичностью. Свойства металлов могут значительно измениться при очень высоких давлениях ($10^{10} \dots 10^{11}$ Па). Многие металлы в зависимости от температуры и давления могут существовать в виде нескольких кристаллических модификаций.

Подобными металлическими свойствами обладают более 80 химических элементов и множество металлических сплавов. Число металлических сплавов, применяемых в технике, исчисляется тысячами и постоянно возрастает в соответствии с возникающими новыми и разнообразными требованиями, предъявляемыми многими отраслями промышленности.

Свойства металлов обусловлены их кристаллическим строением и наличием в их кристаллической решетке многочисленных ($10^{22} \dots 10^{28}$ в 1 см^3) не связанных с атомными ядрами подвижных электронов проводимости. Слабая связь валентных электронов с ядрами атомов обуславливает химические свойства металлов: они легко образуют основные оксиды и гидроксиды, большинство металлов замещают водород в кислотах и т.д.

Для металлов в основном характерно атомное строение в виде ОЦК-, ГЦК- и ГПУ-кристаллических решеток. В парообразном состоянии металлы одноатомны.

Металлические сплавы по свойствам имеют много общего с металлами, поэтому их нередко относят к металлам.

Металлы (сплавы) в промышленности разделяют на две основные группы: *черные и цветные металлы*.

Черные металлы — сплав железа с углеродом, в котором могут содержаться в большем или меньшем количестве и другие химические элементы. Кобальт, никель, а также близкий к ним по свойствам марганец нередко относят к черным металлам. Черные металлы получили

наибольшее распространение, что обусловлено относительно высоким содержанием железа в земной коре, его низкой стоимостью, высокими механическими и технологическими свойствами.

Цветные металлы по свойствам подразделяют на следующие группы:

- *легкие* (Be, Mg, Al, Ti), обладающие сравнительно малой плотностью — до 5000 кг/м^3 ;
- *тугоплавкие* (Ti, Cr, Zr, Nb, Mo, W, V и др.) с температурой плавления выше, чем у железа (1539°C);
- *благородные* (Ph, Pd, Ag, Os, Pt, Au и др.), обладающие химической инертностью;
- *урановые* (U, Th, Pa) — актиноиды, используемые в атомной технике;
- *редкоземельные металлы* (РЗМ), *лантаноиды* (Ce, Pr, Nd, Sm и др.) и сходные с ними иттрий и скандий, применяемые как присадки к различным сплавам;
- *щелочно-земельные металлы* (Li, Na, K), используемые в качестве теплоносителей в ядерных реакторах.

Классификация металлических сплавов по химическому составу, основанная на указании главного компонента сплава (железо, медь, алюминий и др.), имеет традиционный характер и получила наибольшее распространение. Однако внутри таких классов, определенных с учетом химического состава по главному компоненту сплава, распределение на группы и подгруппы чаще всего проводится по характерным особенностям в свойствах или по области применения данного сплава или нескольких сплавов.

2.1. Железо и сплавы на его основе

Железо — Fe, химический элемент VIII группы периодической системы элементов, атомный номер 26, атомная масса 55,847. Блестящий серебристо-серый пластичный металл. Образует полиморфные модификации. На воздухе железо окисляется — покрывается рыхлой ржавчиной.

Физические свойства железа зависят от содержания примесей. Железо с содержанием примесей 0,01...0,1% имеет следующие свойства: плотность 7840 кг/м^3 ; коэффициент теплопроводности $74,04 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; удельное электрическое сопротивление $9,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом/м}$; температурный коэффициент электрического сопротивления $6,51 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; температурный коэффициент линейного расширения $11,7 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$; твердость по Бринеллю 350...450 МПа; модуль Юнга $190...210 \cdot 10^3 \text{ МПа}$; прочность на разрыв $\sigma = 200...250 \text{ МПа}$; относительное удлинение $\delta = 45...55\%$; ударная вязкость $KCU = 220...250 \text{ кДж/м}^2$.

Железо может иметь три полиморфные модификации (α -, σ - и γ - Fe), каждая из которых существует в определенном температурном интервале:

- α -Fe — температурный интервал практически от абсолютного нуля до 911°C, имеет объемно-центрированную кубическую решетку. Плотность — 7860 кг/м³. До температуры 768°C (точка Кюри) эта модификация обладает ферромагнитными свойствами, выше этой температуры — парамагнитными;

- γ -Fe — температурный интервал от 911 до 1392°C, имеет гранецентрированную решетку, плотность — 8000...8100 кг/м³; обладает парамагнитными свойствами;

- δ -Fe — высокотемпературная модификация, существует в интервале от 1392 до 1539°C, имеет объемно-центрированную кубическую решетку и, так же как α -Fe после 768°C, обладает парамагнитными свойствами.

Сплавы, в которых суммарное содержание примесей менее 0,1% и углерода менее 0,02%, называются *технически чистым железом*, а при содержании C менее 0,04% — *техническим железом (армко-железо)*. Техническое железо имеет высокую магнитную проницаемость ($\mu = 4500$ Гс/Э) и является электротехническим магнитно-мягким материалом, применяемым для сердечников, полюсных наконечников, электромагнитов, пластин аккумуляторов. Железный порошок в больших количествах применяется при сварке.

Железо — важнейший металл современной техники: на долю сплавов железа с углеродом и другими элементами (*железоуглеродистые сплавы*) приходится около 95% всей металлической продукции (чугун, сталь, ферросплавы).

Железоуглеродистые сплавы — сплавы Fe (основной компонент) с углеродом. Различают *чистые железоуглеродистые сплавы* (со следами примесей), получаемые в небольших количествах для исследовательских целей, и *технические железоуглеродистые сплавы*, содержащие примеси, легирующие элементы и специальные добавки.

2.1.1. Система «железо — цементит»

Равновесное состояние железоуглеродистых сплавов в зависимости от содержания углерода и температуры описывает *диаграмма состояния «железо — углерод»*. На диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов (рис. 50) по оси ординат отложена температура, по оси абсцисс — содержание в сплавах углерода до 6,67%, т.е. до такого количества, при котором образуется цементит Fe₃C. По этой диаграмме судят о структуре медленно охлажденных сплавов, а также о возможности изменения их микроструктуры в результате термической обработки, определяющей эксплуатационные свойства.

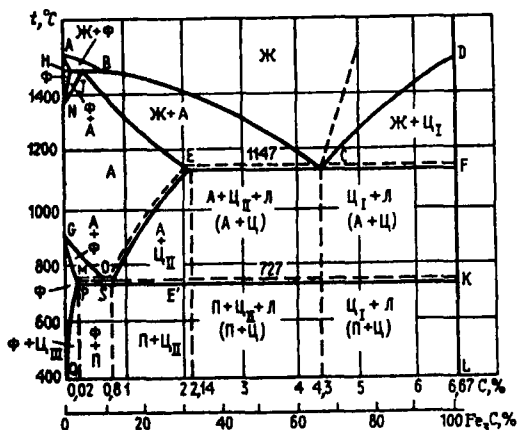


Рис. 50. Диаграмма состояния системы «железо — углерод»

На диаграмме состояния Fe — Fe₃C приняты международные обозначения. Сплошными линиями показана диаграмма состояния «железо — цементит» (метастабильная, так как возможен распад цементита), а пунктирными — диаграмма состояния «железо — графит» (стабильная).

Рассматриваемую диаграмму правильнее считать железоцементитной (Fe — Fe₃C), а не железоуглеродистой (Fe — C), так как свободного углерода в сплавах не содержится. Но так как содержание углерода пропорционально содержанию цементита, то практически удобнее все изменения структуры сплавов связывать с различным содержанием углерода. Компоненты железо и углерод в системе являются полиморфными материалами. Углерод растворим в железе в жидком и твердом состояниях, а также может образовать химическое соединение — цементит Fe₃C или присутствовать в сплавах в виде графита. В системе «железоцементит» (Fe — Fe₃C) имеются следующие фазы: жидкий раствор (расплав), твердые растворы — *феррит* α и *аустенит* γ, а также химическое соединение — *цементит*.

Феррит имеет высоко- и низкотемпературную модификации. Высокотемпературная модификация δ и низкотемпературная α представляют собой твердые растворы углерода, соответственно, в δ- и α-железе.

Предельное содержание углерода в α-феррите при 723°C — около 0,02%, а при 20°C — 0,006%. По свойствам α-феррит близок к чистому железу и имеет довольно низкие механические свойства, например при 0,06% C: σ_в = 250 МПа; δ = 50%; ψ = 80%; твердость — от 80 до 90 НВ.

Аустенит — γ-твердый раствор углерода в γ-Fe. Предельная растворимость в нем углерода равна 2,14%. Он устойчив только при высоких температурах, но с некоторыми примесями (Mn, Cr и др.) может быть

устойчивым и при обычных (даже низких) температурах. Аустенит обладает высокой пластичностью, низкими пределами текучести и прочности. Твердость аустенита — от 160 до 200 НВ.

Цементит Fe_3C — химическое соединение железа с углеродом, содержащее 6,67% углерода. Между атомами железа и углерода в цементите действуют металлическая и ковалентная связи. Температура плавления — около 1250°C. Цементит является метастабильной фазой; область его гомогенности очень узкая, и на диаграмме состояния он изображается вертикалью. Время его устойчивости уменьшается с повышением температуры: при низких температурах он существует бесконечно долго, а при температурах, превышающих 950°C, в течение нескольких часов распадается на железо и графит. Цементит имеет точку Кюри (210°C) и обладает сравнительно высокими твердостью (800 НВ и выше) и хрупкостью. Прочность его на растяжение очень мала ($\sigma_{\text{в}} \approx 40$ МПа).

В системе «железо — цементит» имеются две тонкие механические смеси фаз — эвтектическая (*ледебурит*) и эвтектоидная (*перлит*).

Ледебурит является смесью $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$, образующейся при 1130°C в сплавах, содержащих от 2,0 до 6,67% С, и наблюдается визуально как структурная составляющая железоуглеродистых сплавов (главным образом чугунов). Ледебурит обладает достаточно большими величинами прочности (НВ > 600) и хрупкости.

Перлит (до 2,0% С) представляет собой смесь $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (в легированных сталях — карбидов), образующуюся при 723°C и содержании углерода 0,83% в процессе распада аустенита, и наблюдается визуально как структурная составляющая железоуглеродистых сплавов. Механические свойства перлита зависят от формы и дисперсности частичек цементита (прочность пластинчатого перлита несколько выше, чем зернистого): $\sigma_{\text{в}} = 800\text{—}900$ МПа; $\delta < 16\%$; твердость 180...220 НВ.

Диаграмма состояния $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ (рис. 51) является комбинацией диаграмм простых типов. На ней имеются три горизонтали трехфазных равновесий: перитектического (1496°C), эвтектического (1147°C) и эвтектоидного (727°C). Все линии на диаграмме состояния соответствуют критическим точкам, т.е. температурам, при которых происходят фазовые и структурные превращения в железоуглеродистых сплавах: ABCD — линия начала кристаллизации сплава (ликвидус), AHJECF — линия конца кристаллизации сплава (солидус).

В области диаграммы HJCE находится смесь двух фаз: жидкого раствора и аустенита, а в области CFD — жидкого раствора и цементита. В точке С при содержании 4,3% С и температуре 1130°C происходит одновременная кристаллизация аустенита и цементита и образуется их тонкая механическая смесь — ледебурит. Ледебурит присутствует во всех сплавах, содержащих от 2,0 до 6,67% С (чугуны). Точка Е соответствует предельному насыщению железа углеродом (2,0% С).

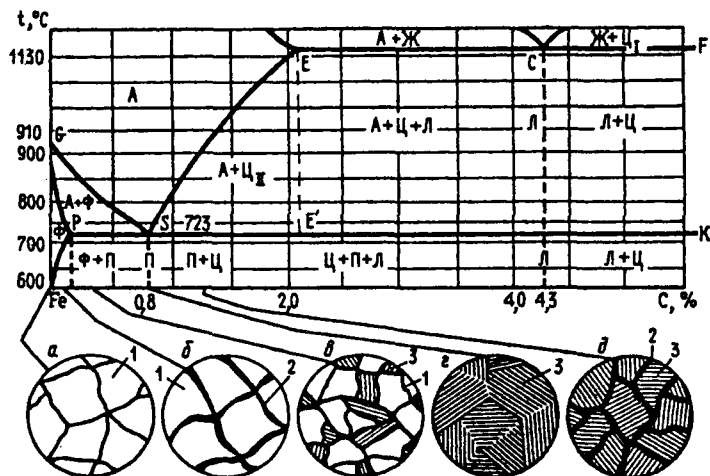


Рис. 51. Схемы микроструктур стали в равновесном состоянии. Условное обозначение структурных составляющих:

а — ферритная; б — ферритно-цементитная; в — ферритно-перлитная; г — перлитная; д — перлитно-цементитная; 1 — феррит; 2 — цементит; 3 — перлит

В области диаграммы AGSF находится аустенит. При охлаждении сплавов аустенит распадается с выделением по линии GS феррита, а по линии SE — вторичного цементита. Линии GSE и PSK имеют большое практическое значение для установления режимов термической обработки сталей: GSE называют *линией верхних критических точек*, а PSK — *нижних критических точек*.

В области диаграммы GSP находится смесь двух фаз — феррита и распадающегося аустенита, а в области диаграммы SEE' — смесь вторичного цементита и распадающегося аустенита. В точке S при содержании 0,8% C и при температуре 723°C весь аустенит распадается и одновременно кристаллизуется тонкая механическая смесь феррита и цементита — перлит. Линия PSK соответствует окончательному распаду аустенита и образованию перлита. В области ниже линии PSK никаких изменений структуры не происходит.

Структурные превращения в сплавах, находящихся в твердом состоянии, вызваны следующими причинами: изменением растворимости углерода в железе в зависимости от температуры сплава (QP и SE), полиморфизмом железа (PSK) и влиянием содержания растворенного углерода на температуру полиморфных превращений (растворение углерода в железе способствует расширению температурной области существования аустенита и сужению области феррита).

Диаграмма стабильного равновесия Fe — Fe₃C, обозначенная на рис. 50 штриховой линией, отображает возможность образования высоко-

коуглеродистой фазы (графита) на всех этапах структурообразования в сплавах с повышенным содержанием углерода. Диаграмма состояния стабильной системы «железо — графит» отличается от метастабильной системы «железо — цементит» только в той части, где в фазовых равновесиях участвует высокоуглеродистая фаза (графит или цементит).

На диаграмме состояния различают две области: стали и чугуны. Условия принятого разграничения — возможность образования ледебурита (предельная растворимость углерода в аустените):

- *стали* — до 2,14% С, не содержат ледебурита;
- *чугуны* — более 2,14% С, содержат ледебурит.

В зависимости от процентного содержания углерода железоуглеродистые сплавы получили следующие названия: *доэвтектоидные стали* (менее 0,83% С); *эвтектоидные стали* (0,83% С); *заэвтектоидные стали* (0,83...2% С); *доэвтекктические чугуны* (2...4,3% С); *заэвтекктические чугуны* (4,3...6,67% С).

Сплавления железо с углеродом и варьируя содержание компонентов, получают сплавы с различными структурой и свойствами.

2.1.2. Стали и сплавы

Сталь — деформируемый (ковкий) сплав железа (основа) с углеродом (до 2%) и (или) другими элементами (сплавы).

2.1.2.1. Структура сталей в равновесном состоянии

Вид окончательно сформировавшейся микроструктуры сталей и сплавов зависит от содержания в них углерода и может быть определен по структурной диаграмме состояния Fe — Fe₃C в соответствии с процессами, которые происходят для соответствующего состава сплава.

Микроструктура сталей, содержащих до 0,006% С, имеет зернистое (полиэдрическое) строение и представляет собой чистый феррит (см. рис. 51, а). Такие стали при небольшой прочности обладают высокой пластичностью и ударной вязкостью.

При содержании в сталях углерода от 0,006 до 0,025% (техническое железо) их микроструктура представляет собой зерна феррита и расположенный по границам этих зерен третичный цементит (см. рис. 51, б). Хрупкая цементитная сетка снижает пластичность и вязкость сталей.

Микроструктура сталей с содержанием углерода 0,025...0,8% состоит из зерен феррита и перлита (см. рис. 51, в). При этом в сталях с содержанием углерода до 0,1...0,15% еще сохраняются включения третичного цементита. В структуре таких сталей при увеличении содержания углерода увеличивается количество перлита и, соответственно, уменьшается количество феррита, что ведет к повышению прочности и твердости стали с одновременным снижением ударной вязкости и относительного удлинения.

Рис. 52. Влияние содержания углерода на механические свойства сталей и сплавов

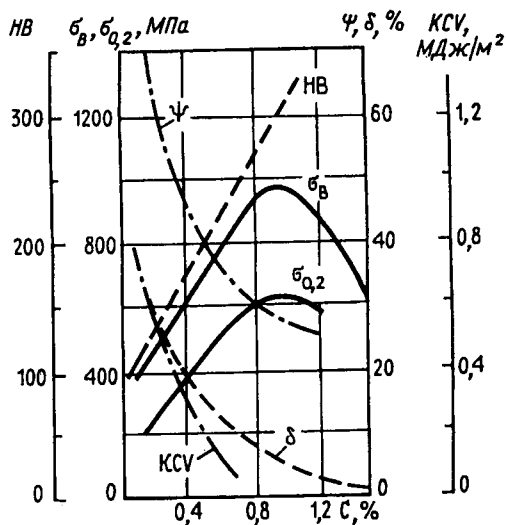
При содержании углерода 0,8% микроструктура представляет собой зерна чистого перлита (см. рис. 51, з). При рассмотрении под микроскопом перлит имеет вид темных включений неоднородного строения. Вследствие значительной дисперсности структуру перлита можно отчетливо различать только при увеличениях более чем в 500 раз. Перлит может иметь пластинчатую или зернистую структуру, что определяют условия охлаждения. При этом сталь с зернистой структурой перлита отличается лучшей пластичностью и обрабатываемостью резанием.

В микроструктуре стали, содержащей свыше 0,8% углерода, по границам зерен перлита располагается вторичный цементит, выделяющийся из аустенита при охлаждении вследствие уменьшения растворимости углерода. При содержании в стали 1% углерода цементит образует хрупкую сетку, которая разобщает между собой зерна перлита (см. рис. 51, д). Прочность стали при этом снижается.

Цементит третичный в сталях и чугунах, а также цементит вторичный в эвтектических и заэвтектических чугунах в виде самостоятельных структурных составляющих при микроструктурном анализе обычно не обнаруживаются.

Рассмотренные равновесные структуры обратимы, т.е. они многократно реализуются при нагреве и охлаждении сплавов. Это справедливо только в случае, если нагревы и охлаждения протекают с достаточно малыми скоростями, т.е. все фазовые превращения завершены и можно не учитывать необходимые для этого перегревы и переохлаждения.

Для количественной оценки компонентов структурного состава используют *правило отрезков*, реализуемое на диаграмме Fe — Fe₃C.



2.1.2.2. Влияние углерода и постоянных (технологических) примесей на свойства сталей и сплавов

Постоянные (технологические) примеси являются обязательными компонентами сталей и сплавов, что объясняется трудностью их удаления как при выплавке (P, S), так и в процессе раскисления (Si, Mn)

или из шихты — легированного металлического лома (Ni, Cr и др.). К постоянным примесям относят *углерод, марганец, кремний, серу, фосфор*, а также *кислород, водород и азот*. Постоянные примеси могут присутствовать в виде твердых и газообразных фаз. Однако они не оказывают существенного влияния на положение критических точек диаграммы Fe — C.

Характер влияния этих примесей на свойства сталей и сплавов определяется их возможностью образовывать самостоятельные фазы с основным компонентом — железом, а также местом возникновения этих фаз.

Углерод в соответствии с диаграммой состояния «железо — цементит» может образовывать с железом твердый раствор α и цементит Fe_3C . Содержание цементита в сплавах можно оценивать прямо по диаграмме состояния, используя дополнительную шкалу абсцисс по содержанию цементита (см. рис. 50), так как его количество в сталях пропорционально содержанию углерода.

Влияние углерода на свойства сталей в основном определяется свойствами цементита (*закон аддитивности*) и связано с изменением содержания основных структурных составляющих — феррита и цементита. Следовательно, при увеличении содержания углерода до 1,2% (рис. 52) возрастают прочность, твердость, порог хладноломкости (0,1% C повышает температуру порога хладноломкости на 20°C), предел текучести, величина электрического сопротивления и коэрцитивная сила. При этом снижаются плотность, теплопроводность, вязкость, пластичность, величины относительных удлинения и сужения, а также величины остаточной индукции.

Существенную роль играет то, что изменение физических свойств приводит к ухудшению целого ряда технологических свойств, таких как деформируемость при штамповке, свариваемость и др. Так, хорошей свариваемостью отличаются низкоуглеродистые стали. Сварка средне- и особенно высокоуглеродистых сталей требует применения подогрева, замедляющего охлаждения, и других технологических операций, предупреждающих образование трещин.

Марганец вводят в стали как технологическую добавку для повышения степени их раскисления и устранения вредного влияния серы. Марганец считается технологической примесью при его содержании, не превышающем 0,8%. Марганец присутствует в сталях и сплавах в виде твердого раствора α и как технологическая примесь и существенного влияния на свойства сталей не оказывает.

Кремний также вводят в сталь для раскисления. Содержание кремния как технологической примеси обычно не превышает 0,37%. Кремний присутствует в сталях и сплавах в твердом растворе α и как технологическая примесь влияния на свойства стали не оказывает. В сталях, предназначенных для сварных конструкций, содержание кремния не должно превышать 0,12...0,25%.

Сера практически нерастворима в аустените и присутствует в сталях и сплавах в виде хрупких сульфидов FeS и MnS , входящих в эвтектику с температурой плавления 985°C . Причем эта эвтектика, как правило, кристаллизуется по границам зерен. Пределы содержания серы как технологической примеси составляют $0,035...0,06\%$.

Повышение содержания серы существенно снижает механические и физико-химические свойства сталей, в частности пластичность, ударную вязкость, сопротивление истиранию и коррозионную стойкость. При горячем деформировании сталей и сплавов большое содержание серы ведет к красноломкости, проявляющейся появлением надрывов по включениям FeS . Кроме того, повышенное содержание серы снижает свариваемость готовых изделий.

Фосфор, как и сера, относится к наиболее вредным примесям в сталях и сплавах. Пределы содержания фосфора как технологической примеси составляют $0,025...0,045\%$. Фосфор в сталях и сплавах присутствует в твердом растворе α . Увеличение его содержания даже на доли процента, повышая прочность, одновременно повышает текучесть, хрупкость и порог хладноломкости и снижает пластичность и вязкость. Это объясняется тем, что фосфор вызывает сильную внутрикристаллическую ликвацию и способствует росту зерен в металле. Вредное влияние фосфора особенно сильно сказывается при повышенном содержании углерода.

Кислород и *азот* растворяются в ничтожно малом количестве и загрязняют сталь неметаллическими включениями (оксидами, нитридами, газовой фазой). Они оказывают отрицательное воздействие на свойства, вызывая анизотропию механических свойств, повышение хрупкости и порога хладноломкости, а также снижают вязкость и выносливость. Содержание кислорода более $0,03\%$ вызывает старение сталей, а более $0,1\%$ — красноломкость. Азот увеличивает прочность и твердость стали, но снижает пластичность. Повышенное содержание азота вызывает деформационное старение. Старение медленно развивается при комнатной температуре и ускоряется при нагреве до 250°C .

Водород содержится в твердом растворе α или скапливается в порах и на дислокациях. Увеличение его содержания в сталях и сплавах приводит к увеличению хрупкости. Кроме того, в изделиях проката могут возникать *флокены*, которые развивает водород, выделяющийся в поры.

Флокены — дефекты внутреннего строения стали в виде серебристо-белых пятен (в изломе) или волосовин (на протравленных шлифах). Встречаются главным образом в катаных и кованных изделиях.

Флокены инициируют процесс разрушения. Металл, имеющий флокены, нельзя использовать в промышленности.

2.1.2.3. Влияние термической, термомеханической и химико-термической обработок на свойства стали и сплавов

Термической обработкой стали называют процессы нагрева и охлаждения, проведенные по определенному режиму, для направленного изменения ее структуры с целью получения необходимых эксплуатационных свойств. Возможность влияния термической обработки на структуру и свойства сталей и сплавов определяется вторичной кристаллизацией, которая в соответствии с диаграммой состояния Fe — Fe₃C (см. рис. 50) происходит по линиям GS, SE и PK.

Вторичная кристаллизация при медленном охлаждении протекает в полном соответствии с диаграммой состояния в три этапа:

- 1) превращение аустенита в феррит;
- 2) выделение из аустенита мельчайших частиц цементита;
- 3) укрупнение частиц цементита, размеры которых меняются от долей микрона до нескольких микрон.

После реализации всех трех этапов образуется структурная составляющая — перлит.

Существенное значение для протекания вторичной кристаллизации имеют условия охлаждения. Незначительная степень переохлаждения или весьма медленное охлаждение обеспечивают получение равновесных структур. Чем больше степень переохлаждения аустенита или скорость его охлаждения, тем более неравновесной будет структура получаемой стали. Изменяя условия охлаждения, можно получить различные модификации структур, а именно *сорбит*, *троостит* или *мартенсит*, что существенно влияет на свойства сталей и сплавов.

Сорбит получают при скорости охлаждения около 50°С/с. При образовании этой структуры протекание всех перечисленных выше этапов происходит, но достаточно ограниченно. Толщина образовавшихся при этом пластинок цементита составляет $0,1...0,5 \cdot 10^{-8}$ м. Твердость сорбита 250...350 НВ.

Троостит образуется при скорости охлаждения 50...100°С/с. При такой скорости охлаждения возможны только первый и второй этапы вторичной кристаллизации. Пластины цементита в троостите не превышают по толщине $1 \cdot 10^{-10}$ м. Твердость троостита 350...450 НВ.

Мартенсит стали — пересыщенный метастабильный твердый раствор внедрения углерода в α -Fe с искаженной кристаллической решеткой, получаемый при скорости охлаждения 150...200°С/с. Минимальную скорость охлаждения, при которой весь аустенит переохлаждается и превращается в мартенсит, называют *критической скоростью закалки*. При нагреве мартенсит переходит в более устойчивые структуры: троостит, сорбит и перлит.

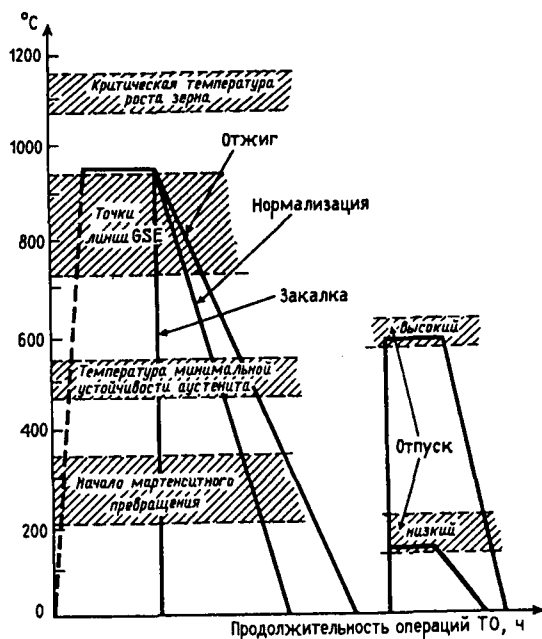


Рис. 53. Схемы основных видов термической обработки сталей

Мартенсит получается путем реализации только первого этапа вторичной кристаллизации и имеет характерное пластинчатое, под микроскопом — игольчатое, строение. Рост пластин путем сдвига происходит мгновенно со скоростью около 1000 м/с по бездиффузионному механизму, так как диффузионный переход атомов из кристаллов аустенита в мартенсит при низких температурах невозможен.

Мартенсит имеет наибольший удельный объем по сравнению с другими структурными составляющими сталей и особенно с аустенитом. Увеличение удельного объема при образовании мартенсита приводит к возникновению при закалке больших внутренних напряжений, вызывающих деформацию изделий или даже появление трещин.

При образовании мартенсита получают максимальные значения твердости (НВ 180...650) и хрупкости при минимальных значениях плотности и вязкости. Твердость мартенсита возрастает с увеличением содержания в нем углерода. Однако увеличение содержания углерода повышает склонность мартенсита к хрупкому разрушению.

Основные виды термической обработки стали — *отжиг*, *закалка* и *отпуск* (рис. 53).

Отжиг стали — термическая обработка, включающая при полном отжиге нагрев до температуры выше верхних критических точек на 30...50°C, выдержку при такой температуре до полного прогрева металла

и последующее очень медленное охлаждение (вместе с охлаждаемой печью). При неполном отжиге нагрев сталей производится до температур выше нижних критических точек на 30...50°C, а при низкотемпературном отжиге — до температур, лежащих ниже указанных точек. При неполном и низкотемпературном отжиге происходит только частичная перекристаллизация. Структура сталей после отжига образуется в полном соответствии с диаграммой состояния железоуглеродистых сплавов.

Отжиг сталей производят в тех случаях, когда необходимо уменьшить твердость, повысить пластичность и вязкость, ликвидировать последствия перегрева, получить равновесное состояние, улучшить обрабатываемость при резании.

Разновидностями отжига сталей являются:

1. *Нормализационный отжиг (нормализация)* — вид термической обработки стали, заключающийся в нагреве до температуры на 30...50°C выше верхних критических точек, выдержке и охлаждении на спокойном воздухе. В результате нормализации стали с содержанием углерода менее 0,3% приобретают ферритно-перлитную структуру, а стали с содержанием углерода 0,3...0,7% — сорбитную.

Нормализация применяется в тех случаях, когда необходимо получить однородную мелкозернистую структуру с более высокой твердостью и прочностью, но с несколько меньшей пластичностью, чем после отжига. При нормализации в заэвтектоидных сталях устраняется цементитная сетка, поэтому ею часто заменяют полный или неполный отжиг при подготовке углеродистых сталей к механической обработке. Нормализация — более производительный и экономичный процесс, чем отжиг.

2. *Изотермический отжиг* — вид термической обработки стали, заключающийся в нагреве стали до температуры, на 30...50°C превышающей верхнюю критическую, выдержке при этой температуре, а затем переносе детали в другую печь с заданной (ниже верхней критической) температурой для ее изотермической выдержки до полного распада аустенита. Изотермический отжиг улучшает обрабатываемость резанием и применяется при изготовлении деталей и заготовок небольших размеров.

Закалка стали — термическая обработка, включающая нагрев до температур выше верхних критических точек на 30...50°C, выдержку при этих температурах до полного прогрева металла и последующее очень быстрое его охлаждение. В результате закалки в стали из аустенита образуется мартенсит. Стали, подвергающиеся закалке, характеризуются *закаливаемостью* и *прокаливаемостью*.

Закаливаемость — способность стали повышать твердость в результате закалки.

Прокаливаемость — способность стали образовывать закаленный слой со структурой мартенсита и высокой твердостью. Прокаливаемость об-

разца характеризуется максимально получаемой твердостью по сечению изделия (образца).

Стали с малым содержанием углерода закалить на мартенсит очень трудно, так как начало и конец процесса образования мартенсита происходят в области высоких температур, соответствующих образованию других, более устойчивых структур (троостит, сорбит). Прокаливаемость обыкновенных углеродистых сталей распространяется на 5...7 мм.

Микроструктура закаленных сталей зависит от их химического состава и условий закалки (температура нагрева и режим охлаждения). Закалка стали с содержанием углерода до 0,025...0,03% задерживает выделение третичного цементита по границам зерен и не меняет структуру феррита. Такая закалка повышает пластичность и почти не изменяет прочностных характеристик.

Микроструктура стали с содержанием углерода 0,08...0,15% (с нагревом выше верхних критических точек и охлаждением в воде) представляет собой низкоуглеродистый мартенсит с выделениями феррита. Дальнейшее увеличение содержания углерода (0,15...0,25%) при тех же условиях закалки приводит к повышению твердости с 110...130 до 140...180 НВ, а предел текучести возрастает на 30...50%. Наиболее значительное изменение свойств происходит при содержании углерода более 0,30...0,35%.

Микроструктура доэвтектоидных сталей представляет собой мартенсит, кристаллы которого имеют характерную форму пластин (игл). При содержании углерода более 0,5...0,6% в микроструктуре сталей наблюдается незначительное (2...3%) количество аустенита.

Микроструктура заэвтектоидных сталей состоит из мартенсита, зерен вторичного цементита (не растворившегося при нагреве) и остаточного аустенита. Кристаллы (иглы) мартенсита очень небольших размеров. Повышение температуры закалки вызывает растворение вторичного цементита и способствует росту зерна.

В тех случаях, когда требуются высокая твердость и повышенная износостойчивость поверхности при сохранении вязкой и достаточно прочной сердцевины изделия, применяется *поверхностная закалка*, т.е. закалка не на полную глубину. Поверхностной закалке подвергают стали при содержании углерода более 0,3%. Оптимальная толщина упрочняемого слоя определяется условиями работы детали и составляет от 1,5 до 15 мм (и выше). Площадь сечения закаленного слоя не должна превышать 20% площади всего сечения. В практике наиболее часто используют поверхностную закалку с индукционным нагревом током высокой частоты.

Мартенситная структура стали после закалки метастабильна, и для ее превращения в более устойчивую структуру производят *отпуск*.

Отпуск стали — термическая обработка, включающая нагрев закаленной стали до температуры ниже критических точек, выдержку при

этой температуре и охлаждение. В результате отпуска в зависимости от температуры нагрева неустойчивая структура мартенсита заковки вследствие диффузионного перераспределения углерода превращается в более устойчивые структуры — *мартенсит отпуска*, троостит, сорбит и перлит.

Мартенсит отпуска имеет измененную кристаллическую решетку, и его образование сопровождается объемными изменениями, выделением теплоты и частичным снятием внутренних напряжений. При более высокой температуре нагрева образуются троостит, сорбит и перлит отпуска, которые, в отличие от структур, получаемых из аустенита при непрерывном охлаждении, имеют зернистую, а не пластинчатую микроструктуру. Стали с зернистой микроструктурой отпуска характеризуются более высокой пластичностью и лучшей обрабатываемостью резанием.

В зависимости от температуры отпуска различают низко- (низкий), средне- (средний) и высокотемпературный (высокий) виды отпуска. Закалка на мартенсит с последующим высоким отпуском называется *улучшением сталей*. Улучшение обеспечивает хороший комплекс свойств (прочность, ударная вязкость, твердость) и применяется для ответственных изделий из среднеуглеродистых сталей (коленчатые валы, шатуны и другие детали).

К основным дефектам, которые могут возникнуть при закалке сталей, относят трещины и деформацию. Трещины — неисправимый дефект, предупредить который можно конструктивным решением (избегать в изделии конструктивных элементов, которые могут стать концентраторами напряжений) и тщательным соблюдением режимов термообработки. Деформация, т.е. изменение размеров и формы изделий, всегда сопровождает процессы термической обработки, особенно заковки. Несимметричную деформацию изделий в практике часто называют *короблением*. Деформацию можно уменьшить подбором соответствующего состава стали и условий термической обработки, а избежать коробления можно, обеспечив равномерность нагрева под заковку и правильное положение детали при погружении в закалочную среду.

Легированная сталь имеет меньшую теплопроводность, чем углеродистая, поэтому требует замедленного нагрева и охлаждения во избежание коробления и трещин.

Термомеханическая обработка (ТМО) стали — совокупность операций термической обработки с пластической деформацией, которая проводится либо выше критических точек (ВТМО), либо при температуре переохлажденного (500...700°C) аустенита (НТМО). Такой вид обработки позволяет получить сталь высокой прочности (до 270 МПа). Формирование структуры сталей при ТМО происходит в условиях повышенной

плотности и оптимального распределения дислокаций. Окончательными операциями ТМО для избежания развития рекристаллизации являются немедленная закалка и низкотемпературный (100...300°C) отпуск.

Термомеханическая обработка с последующими закалкой и отпуском позволяет получить очень высокую прочность ($\sigma_b = 2200...3000$ МПа) при хорошей пластичности ($\delta = 6...8\%$, $\psi = 50...60\%$) и вязкости. В практических целях большее распространение получила ВТМО, обеспечивающая, наряду с высокой прочностью, хорошее сопротивление усталости, большую работу распространения трещин, а также сниженные критическую температуру хрупкости, чувствительность к концентраторам напряжений и необратимую отпускную хрупкость.

ВТМО осуществляется в цехах прокатного производства на металлургических заводах, например, при упрочнении прутков для штанг, рессорных полос, труб и пружин.

Химико-термическая обработка (ХТО) стали — совокупность операций термической обработки с насыщением поверхности изделия различными элементами (C, N, Al, Si, Cr и др.) при высоких температурах.

Поверхностное насыщение стали металлами (Cr, Al, Si и др.), образующими с железом твердые растворы замещения, более энергоемко и продолжительнее, чем насыщение азотом и углеродом, образующими с железом твердые растворы внедрения. При этом диффузия элементов легче протекает в кристаллической решетке феррита, чем в более плотно упакованной решетке аустенита.

Химико-термическая обработка повышает твердость, износостойкость, кавитационную и коррозионную стойкости и, создавая на поверхности изделий благоприятные остаточные напряжения сжатия, увеличивает их надежность и долговечность.

Цементация стали — химико-термическая обработка поверхностным насыщением малоуглеродистой ($C < 0,2\%$) или легированных сталей при температурах 900...950°C — твердым (цементация твердым карбюризатором), а при 870...900°C — газообразным (газовая цементация) углеродом с последующими закалкой и отпуском. Цель цементации и последующей термической обработки — повышение твердости, износостойкости и пределов контактной выносливости поверхности изделия при вязкой сердцевине, что обеспечивает выносливость изделия в целом при изгибе и кручении.

Азотирование стали — химико-термическая обработка поверхностным насыщением стали азотом путем длительной выдержки ее при нагреве до 600...650°C в атмосфере аммиака NH_3 . Азотированные стали обладают очень высокой твердостью (азот образует различные соединения с Fe, Al, Cr и другими элементами, обладающие большей твердостью, чем карбиды) и повышенной сопротивляемостью коррозии в таких средах, как атмосфера, вода, пар и др.

Азотированные стали сохраняют высокую твердость, в отличие от цементованных, до сравнительно высоких температур (500...520°C). Азотированные изделия не коробятся при охлаждении, так как температура азотирования ниже, чем цементации. Азотирование сталей широко применяют в машиностроении для повышения твердости, износостойкости, предела выносливости и коррозионной стойкости ответственных деталей, например зубчатых колес, валов, гильз цилиндров и др.

Нитроцементация (цианирование) стали — химико-термическая обработка с одновременным поверхностным насыщением изделий азотом и углеродом при повышенных температурах с последующими закалкой и отпуском для повышения износо- и коррозионной устойчивости, а также усталостной прочности. Нитроцементация может проводиться в газовой среде при температурах 840...860°C (нитроцианирование) и в жидкой при температурах 820...950°C (жидкостное цианирование в расплавленных солях, содержащих группу NaCN).

Нитроцементация эффективна для инструментальных (в частности, быстрорежущих) сталей; она используется при изготовлении деталей сложной конфигурации, склонных к короблению. Однако в настоящее время применяется только нитроцианирование, поскольку процесс жидкостного цианирования связан с использованием токсичных цианистых солей.

Борирование стали — химико-термическая обработка насыщением поверхностных слоев стальных изделий бором при температурах 900...950°C. Цель борирования — повышение твердости, износостойкости и некоторых других свойств стальных изделий. Диффузионный слой толщиной 0,05...0,15 мм, состоящий из боридов FeB и Fe₂B, обладает весьма высокой твердостью, стойкостью к абразивному изнашиванию и коррозионной стойкостью. Борирование особенно эффективно для повышения стойкости (в 2—10 раз) бурового и штампового инструментов.

Цинкование (Zn), алитирование (Al), хромирование (Cr), силицирование (Si) сталей выполняются аналогично цементации с целью придания изделиям из стали некоторых ценных свойств: жаро- и износостойкости, коррозионной устойчивости. В настоящее время все большее распространение получают процессы многокомпонентного диффузионного насыщения.

2.1.2.4. Влияние легирующих элементов на свойства стали и сплавов

Легированной называется сталь, в которой кроме обычных примесей содержатся специально вводимые в определенных сочетаниях легирующие элементы (Cr, Ni, Mo, W, V, Al, B, Ti и др.), а также Mn и Si

в количествах, превышающих их обычное содержание как технологических примесей (1% и выше). Как правило, лучшие свойства обеспечивает комплексное легирование.

Легирование сталей и сплавов используют для улучшения их технологических свойств — повышения предела текучести, ударной вязкости, относительного сужения и прокаливаемости, а также существенного снижения скорости закалки, порога хладноломкости, деформируемости изделий и возможности образования трещин. В изделиях крупных сечений (диаметром свыше 15...20 мм) механические свойства легированных сталей значительно выше, чем углеродистых.

Легирующие элементы по механизму их воздействия на свойства сталей и сплавов можно разделить на три группы:

- 1) влияние на полиморфные (α -Fe $\rightarrow$ γ -Fe) превращения;
- 2) образование с углеродом карбидов $(Cr, Fe)_7C_3$; $(Cr, Fe)_{23}C_6$; Mo_2C и др.;
- 3) образование интерметаллидов (интерметаллических соединений) с железом — Fe_7Mo_6 ; Fe_3Nb и др.

По характеру влияние на полиморфные превращения легирующие элементы можно разделить на две группы (рис. 54):

элементы (Cr, W, Mo, V, Si, Al и др.), достаточное содержание которых обеспечивает существование в сталях при всех температурах легированного феррита (*ферритные сплавы*);

элементы (Ni, Mn и др.), стабилизирующие при достаточной концентрации легированный аустенит при всех температурах (*аустенитные сплавы*).

Сплавы, только частично претерпевающие превращение $\gamma \rightarrow \alpha$, называются, соответственно, *полуаустенитными* или *полуферритными*.

Легирование феррита сопровождается его упрочнением. Наиболее значительно влияют на его прочность марганец и хром. Причем чем мельче зерно феррита, тем выше его прочность. Многие легирующие элементы способствуют измельчению зерен феррита и перлита в стали, что значительно увеличивает ее вязкость. Однако все легирующие элементы, за исключением никеля, при содержании их в растворе выше определенного предела снижают ударную вязкость, трещиностойкость и повышают порог хладноломкости. Никель понижает порог хладноломкости.

Легированный аустенит парамагнитный, обладает большим коэффициентом теплового расширения. Легирующие элементы, в том числе азот и углерод, растворимость которого в аустените при нормальной температуре достигает 1%, повышают его прочность при нормальной и высокой температурах, уменьшают предел текучести. Легированный

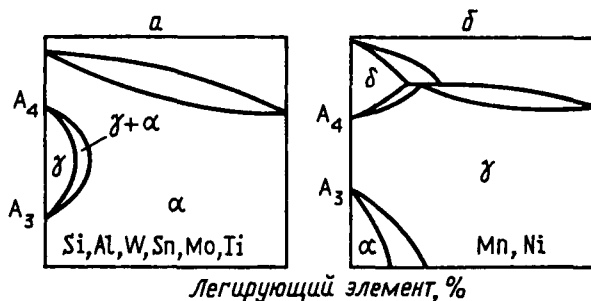


Рис. 54. Диаграмма состояния «железо — легирующий элемент» с расширением области существования α -фазы (а) или γ -фазы (б)

аустенит является основной составляющей (матрицей) многих коррозионностойких, жаропрочных и немагнитных сплавов. Он легко наклепывается, т.е. быстро и сильно упрочняется под действием холодной деформации.

Легирующие элементы (исключение — кобальт), повышая устойчивость аустенита, снижают критическую скорость заковки и увеличивают прокаливаемость. Для многих аустенитных сплавов критическая скорость заковки снижается до $20^\circ\text{C}/\text{с}$ и ниже, что имеет большое практическое значение.

Карбидообразующие элементы Fe — Mn — Cr — Mo — W — Nb — V — Zr — Ti (расположены по возрастающей степени сродства к углероду и устойчивости карбидных фаз) при малом их содержании растворяются в цементите, замещая в нем атомы железа. Состав карбида в этом случае может быть выражен формулой $(\text{Fe}, \text{M})_m\text{C}_n$, где M — символ суммы легирующих элементов, m, n — коэффициенты, определяемые химической формулой карбида. При повышении содержания карбидообразующих элементов могут образовываться самостоятельные карбиды.

Выделение из твердого раствора карбидов MC , M_2C нередко вызывает повышение твердости — *дисперсионное упрочнение*. Карбидообразующие элементы (за исключением марганца) препятствуют росту зерна аустенита при нагреве, а также замедляют процесс коагуляции дисперсных частиц, поэтому сталь, легированная этими элементами, при одинаковой температуре сохраняет более высокую дисперсность карбидных частиц и, соответственно, большую прочность.

Интерметаллиды образуются при высоком содержании легирующих элементов между этими элементами или с железом. Примером таких соединений могут служить Fe_7Mo_6 , Fe_3Nb_2 и др. Интерметаллиды, как правило, отличаются высокими твердостью и хрупкостью.

По применимости для легирования можно выделить три группы элементов: 1) Mn, Si, Cr, B; 2) Ni, Mo; 3) V, Ti, Nb, W, Zr и др. Применимость

для легирования различных элементов определяется не столько физически, сколько в основном экономическими соображениями.

В табл. 4 показано влияние наиболее широко используемых легирующих элементов на свойства стали.

Таблица 4

Влияние легирующих элементов на свойства стали

Легирующий элемент	Входит в твердый раствор с Fe и упрочняет его	Увеличивает ударную вязкость	Расширяет область аустенита	Сужает область аустенита	Увеличивает прокаливаемость	Способствует раскислению	Образует устойчивые карбиды	Повышает сопротивление коррозии
Ni	+	+	+	—	+	—	—	+
Cr	+	—	—	+	—	—	+	+
Mn (более 1%)	+	+	+	—	+	+	+	+
Si (более 0,8%)	+	+	—	+	—	+	—	—
W	—	—	—	—	—	—	+	—
Cu (0,3—0,5%)	+	—	—	—	—	—	—	+

2.1.2.5. Общая классификация сталей

Классификация сталей и сплавов производится по химическому составу, качеству (способу производства и содержанию вредных примесей), а также по назначению.

По химическому составу стали классифицируют на углеродистые и легированные.

Углеродистые стали делят в зависимости от содержания углерода на

- малоуглеродистые — менее 0,6% С;
- среднеуглеродистые — от 0,6 до 0,7% С;
- высокоуглеродистые — более 0,7% С.

Легированные стали в зависимости от введенных элементов подразделяют на хромистые, марганцовистые, хромоникелевые, марганцевые и многие другие. Их классификация по химическому составу определяется суммарным процентом содержания легирующих элементов:

- низколегированные — менее 5%;
- среднелегированные — 5...10%;
- высоколегированные — более 10%.

Легированные стали и сплавы делятся также на классы по структурному составу:

- в отожженном состоянии — *доэвтектоидный, заэвтектоидный, ледебуритный (карбидный), ферритный, аустенитный*;
- в нормализованном состоянии — *перлитный, мартенситный и аустенитный классы*. К перлитному классу относят углеродистые и легированные стали с низким содержанием легирующих элементов, к мартенситному классу — с их более высоким содержанием, а к аустенитному — с высоким содержанием легирующих элементов.

По качеству, т.е. по условиям производства (способу производства и содержанию вредных примесей), стали и сплавы делятся на следующие группы:

	сера, менее, %	фосфор, менее, %
<i>обыкновенного качества (рядовые)</i>	0,050	0,040;
<i>качественные</i>	0,040	0,035;
<i>высококачественные</i>	0,025	0,025;
<i>особо высококачественные</i>	0,015	0,025.

Стали обыкновенного качества по химическому составу — углеродистые стали, содержащие до 0,6% С. Эти стали выплавляются в конвертерах с применением кислорода или в больших мартеновских печах.

Стали обыкновенного качества, являясь наиболее дешевыми, уступают по механическим свойствам сталям других классов, так как отличаются повышенными ликвацией (химической и структурной неоднородностью) и количеством неметаллических включений.

Стали качественные по химическому составу могут быть *углеродистыми* или *легированными*. Они также выплавляются в конвертерах или в основных мартеновских печах, но с соблюдением более строгих требований к составу шихты, процессам плавки и разливки.

Оба вида сталей по степени раскисления и характеру затвердевания металла в изложнице делят на *спокойные (сп)*, *полуспокойные (пс)* и *кипящие (кп)*. Каждый из этих сортов отличается содержанием кислорода, азота и водорода. Так, в кипящих сталях содержится наибольшее количество этих элементов.

Стали высококачественные выплавляются преимущественно в электропечах, а особо высококачественные — в электропечах с электрошлаковым переплавом или другими совершенными методами, что гарантирует повышенную чистоту по неметаллическим включениям и содержанию газов, а следовательно, улучшение механических свойств.

По назначению стали и сплавы делят на *конструкционные, инструментальные стали и стали с особыми физическими и химическими свойствами*.

2.1.2.6. Маркировка сталей по химическому составу

Эта маркировка является наиболее общей, так как учитывает также область применения, условия производства и качество сталей. Однако некоторые стали более узкого применения (например, автоматные, шарикоподшипниковые, быстрорежущие и др.) маркируются иначе, что будет рассмотрено в соответствующих разделах.

Новые стали и сплавы, еще не включенные в государственные стандарты и поставляемые по техническим условиям, обозначаются буквами, указывающими на завод-изготовитель (например, ЭК, ЭП или ЭИ — завод «Электросталь»), и номером, присвоенным этим заводом.

Углеродистые стали. На долю углеродистых сталей приходится 80% общего объема производства сталей и сплавов. Это объясняется тем, что эти стали дешевы и сочетают удовлетворительные механические свойства с хорошей обрабатываемостью резанием и давлением. Однако они менее технологичны при термической обработке.

По назначению углеродистые стали делят на конструкционные и инструментальные. Первые в свою очередь делятся на углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества и углеродистые конструкционные качественные стали.

Углеродистая конструкционная сталь обыкновенного качества (ГОСТ 380—94) содержит 0,06...0,49% С; 0,25...1,2% Мn; 0,05...0,3% Si. Массовые доли Cr, Ni и Cu должны быть не более 0,3% каждого, азота — не более 0,01%, серы — не более 0,05%, фосфора — не более 0,04%. В равновесном состоянии эти стали имеют ферритно-перлитную структуру.

В маркировке этих сталей буквы Ст означают «сталь обыкновенного качества», цифры — условный номер марки в зависимости от нормируемых показателей (величин механических свойств). Чем больше условный номер стали, тем больше в ней содержание углерода и перлита и тем выше ее прочность и ниже пластичность.

Углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества изготавливают следующих марок: Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6. Стандартом предусмотрена также сталь с повышенным (0,8...1,2%) содержанием марганца: Ст3Гпс, Ст3Гсп и Ст5Гпс. Наиболее распространенная сталь Ст3сп имеет $\sigma_b = 380...490$ МПа, $\sigma_{0,2} = 210...250$ МПа и $\delta = 25...22\%$, а Ст5сп — $\sigma_b = 500...600$ МПа, $\sigma_{0,2} = 240...280$ МПа и $\delta = 20...17\%$. Чем больше толщина изделия проката, тем ниже значения приведенных характеристик.

Дополнительными индексами в конце марки указываются степень раскисления и характер затвердевания стали (например, Ст3кп, Ст5пс, Ст6сп). С целью гармонизации принятого отечественного обозначения марок с международным в ГОСТ 380—94 приведено их сопоставление (табл. 5).

**Сопоставление марок стали типа Ст и Fe по международным стандартам
ИСО 630—80 и ИСО 1052—82**

Марки стали			
Ст	Fe	Ст	Fe
Ст0	Fe310-0	Ст4кп	Fe430-A
Ст1кп	—	Ст4пс	Fe430-B
Ст1пс	—	Ст4сп	Fe430-C
Ст1сп	—	—	Fe430-D
Ст2кп	—	Ст5пс	Fe510-B, Fe490
Ст2пс	—	Ст5Гпс	Fe510-B, Fe490
Ст2сп	—	Ст5сп	Fe510-C, Fe490
Ст3кп	Fe360-A	Ст6пс	Fe590
Ст3пс	Fe360-B	—	—
Ст3Гпс	Fe360-B	Ст6сп	Fe590
Ст3сп	Fe360-C	—	Fe690
Ст3Гсп	Fe360-C, Fe360-D		

Углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества предназначены для изготовления горячекатаного *проката* (сортового, фасонного различных профилей — балки, швеллеры, уголки, прутки); холоднокатаного тонколистового проката; слитков, блюмов, слябов; катаных и непрерывнолитых труб; поковок и штамповок; ленты, проволоки, метизов и др.

Прокатное производство — получение из металлов и сплавов путем прокатки различных изделий и полуфабрикатов, а также их дополнительная обработка с целью повышения качества. В промышленных странах прокатке подвергается более 80% выплавляемой стали. Основные виды изделий прокатного производства: *прокат, металлический профиль и жечь*.

Прокат — продукция металлургического производства. Различают сортовой и листовой прокат. *Сортовой прокат* используется для производства простых и фасонных профилей и катанки (заготовки для получения проволоки). Из листового проката производят листы, полосы, ленты, жечь, в том числе биметаллические и с покрытиями.

Металлический профиль — изделие, полученное прокаткой, прессованием, формовкой (гибкой) между валками. Различают профили с постоянным по длине поперечным сечением, так называемые переменные профили (в том числе периодические) и специальные (бандажи, колеса, шестерни, шары и др.). Некоторые металлические профили — *квадратный, круглый, полосовой, угловой, двутавровый, швеллерный рельс, тавровый, шпунтовой*.

Жесть — тонкая холоднокатаная отожженная листовая сталь толщиной 0,08...0,32 мм. Для предохранения от воздействия пищевых сред и атмосферной коррозии на поверхность жести наносят защитные покрытия — олово (белая жесь), хром, специальные лаки и др.

Трубное производство — получение полых изделий из металлов преимущественно кольцевого сечения и относительно большой длины. Трубы со швом изготавливают главным образом сваркой, бесшовные — прокаткой (реже прессованием, волочением, литьем).

Трубное производство осуществляется также для керамики, асбоцемента, кирпича, железобетона, дерева, стекла, каучука, пластмасс и других материалов.

Метизное производство — получение стандартизированных металлических изделий (метизов). Различают *промышленные метизы* (стальная проволока, канаты, гвозди, болты, железнодорожные костыли и т.п.) и *метизы широкого назначения* (ножи, пилы и т.д.).

Изделия из углеродистых конструкционных сталей обыкновенного качества широко применяются в строительстве для сварных, клепаных и болтовых конструкций, а также для выполнения кровельных работ. Среднеуглеродистые стали (СТ5, Ст5Г), обладающие большей прочностью, чем низкоуглеродистые, предназначены для рельсов, железнодорожных колес, валов, шкивов, шестерен и других деталей грузоподъемных машин.

Механические свойства углеродистой конструкционной стали обыкновенного качества могут быть значительно повышены, а порог хладноломкости понижен закалкой в воде после прокатного нагрева.

Стали углеродистые конструкционные качественные (ГОСТ 1050—88) содержат не более 0,35% фосфора, не более 0,04% серы, 0,05...0,6% углерода. Эти стали отличаются высокими пластичностью и свариваемостью. Они могут использоваться без упрочняющей термической обработки или после нее.

Качественные углеродистые стали маркируют цифрами 08, 10, 15, 20, ..., 85. Двухзначные числа в марке показывают содержание углерода в сотых долях процента. Дополнительными индексами могут быть отмечены степень раскисления и характер затвердевания стали в изложнице (например, сталь 08кп).

Низкоуглеродистые (менее 0,25% С) качественные конструкционные стали обладают невысокой прочностью ($\sigma_b = 330...460$ МПа, $\sigma_{0,2} = 200...280$ МПа) и высокой пластичностью ($\delta = 33...23\%$). Стали 05кп, 08кп, 08, 10 идут на изготовление деталей сложной конфигурации методом холодной штамповки. Из сталей 15кп, 15, 20 изготавливают болты, гайки, винты, пальцы, валки, оси, крюки, шпильки и другие детали неответственного назначения. Если детали из этих сталей эксплуатируются в условиях изнашивания поверхности, то их подвергают поверхностному упрочнению цементацией или нитроцементацией.

Среднеуглеродистые (0,3...0,5% С) стали 30, 35, ..., 55 используются после нормализации, улучшения и поверхностной закалки. После улучшения стали 40, 45, 50 имеют следующие механические свойства: $\sigma_b = 600...700$ МПа; $\sigma_{0,2} = 400...600$ МПа; $\psi = 50...40\%$ и $KCU = 0,4...0,5$ МДж/м². Прокаливаемость этих сталей невелика. Стали 30, 35, 40, 45 используются для изготовления деталей, от которых требуется сочетание высокой прочности с вязкостью сердцевин (оси, валики, винты, шайбы, втулки, коленчатые валы и др.).

Стали 60, 65, ..., 85 с высоким содержанием (0,6...0,85%) углерода обладают повышенными прочностью, износостойкостью и упругими свойствами. Их применяют после закалки и отпуска, нормализации и отпуска и поверхностной закалки. Из сталей 65, 70, 75, 80, 85 изготавливают детали, работающие в условиях трения и вибрационных нагрузок: прокатные валки (сталь 60), крановые колеса (сталь 75), диски сцепления и впускные клапаны компрессоров (сталь 85), а также пружины и рессоры (ГОСТ 14959—79).

Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435—90) выпускаются качественными (содержание серы не превышает 0,03%, фосфора — 0,035%) и высококачественными (серы не более 0,02% и фосфора — 0,03%). В конце марки высококачественных углеродистых инструментальных сталей ставится буква А.

В углеродистых инструментальных сталях буква У в обозначении марки означает «углеродистая сталь», а цифра показывает содержание углерода в десятых долях процента.

Стали У7 (доэвтектоидная ферритно-перлитная) и У8, У8А (эвтектоидные) наиболее пластичные из углеродистых инструментальных сталей. Они идут на производство молотков, стамесок, долот, зубил. Из сталей У10, У11, У11А изготавливают резцы, сверла, метчики, фрезы, плитки и прочий мерительный и режущий инструмент для резания мягких материалов, а из сталей У12, У13, У13А — инструмент, работающий без ударных нагрузок (напильники, рапиры, бритвы).

Легированные стали. При маркировке легированной стали используют буквенные обозначения легирующих элементов (табл. 6). Эти буквы в сочетании с цифрами используют в обозначении марки стали. Содержание легирующего элемента, если оно превышает 1...1,5%, указывается цифрой (массовая доля в целых процентах), стоящей после соответствующей буквы. Если за буквой отсутствует цифра, то содержание данного элемента около 1%. Исключение сделано для некоторых элементов (V, Ti, Mo, Nb, Zr, B, N и др.), присутствие которых в сталях даже в тысячных долях процента оказывает существенное влияние на свойства сталей (*микролегирование*).

**Условные обозначения легирующих элементов
в металлах и сплавах (по ГОСТ 4543—71)**

Элемент	Символ	Обозначение элементов в марках металлов и сплавов		Элемент	Символ	Обозначение элементов в марках металлов и сплавов	
		черные	цветные			черные	цветные
Азот	N	А	—	Неодим	Nd	—	Нм
Алюминий	Al	Ю	А	Никель	Ni	—	Н
Барий	Ba	—	Бр	Ниобий	Nb	Б	Нп
Бериллий	Be	Л	—	Олово	Sn	—	О
Бор	B	Р	—	Осмий	Os	—	Ос
Ванадий	V	Ф	Вам	Палладий	Pd	—	Пд
Висмут	Bi	Ви	Ви	Платина	Pt	—	Пл
Вольфрам	W	В	—	Празеодим	Pr	—	Пр
Гадолиний	Gd	—	Гн	Рений	Re	—	Ре
Галлий	Ga	Ги	Ги	Родий	Rh	—	Rg
Гафний	Hf	—	Гф	Ртуть	Hg	—	Р
Германий	Ge	—	Г	Рутений	Ru	—	Ру
Гольмий	Ho	—	ГОМ	Самарий	Sm	—	Сам
Диспрозий	Dy	—	ДИМ	Свинец	Pb	—	С
Европий	Eu	—	Ев	Селен	Se	К	СТ
Железо	Fe	—	Ж	Серебро	Ag	—	Ср
Золото	Au	—	Зл	Скандий	Sc	—	Скм
Индий	In	—	Ин	Сурьма	Sb	—	Су
Иридий	Ir	—	И	Таллий	Tl	—	Тл
Иттербий	Yb	—	ИТН	Тантал	Ta	—	ТТ
Иттрий	Y	—	ИМ	Теллур	Te	—	Т
Кадмий	Cd	Кд	Кд	Тербий	Tb	—	Том
Кобальт	Co	К	К	Титан	Ti	Т	ТПД
Кремний	Si	С	Кр(К)	Тулий	Tm	—	ТУМ
Лантан	La	—	Ла	Углерод	C	У	—
Литий	Li	—	Лэ	Фосфор	P	П	Ф
Лютеций	Lu	—	Люн	Хром	Cr	Х	Х(Хр)
Магний	Mg	Ш	Мг	Церий	Ce	—	Се
Марганец	Mn	Г	Мц(Мр)	Цинк	Zn	—	Ц
Медь	Cu	Д	М	Цирконий	Zr	Ц	ЦЭВ
Молибден	Mo	М	—	Эрбий	Er	—	Эрм

Если в начале марки нет цифры, то это означает, что количество углерода составляет 1% и выше. Для конструкционных сталей две цифры впереди марки указывают на среднее содержание углерода в сотых долях процента. Для инструментальных сталей одна цифра в начале марки указывает среднее содержание углерода в десятых долях процента.

Основная масса легированных сталей выплавляется сталями качественными. Отличие в обозначениях качественных, высококачественных и особо высококачественных сталей заключается в том, что в конце

марки высококачественных сталей приписывается буква А, а особо высококачественных — буква Ш. У сталей, применяемых в виде литья (в отливке), в конце марки приписывается буква Л.

Высококачественные стали имеют отклонения от этих правил. Так, в марках инструментальных легированных сталей, а также сталей и сплавов с особыми физическими свойствами буква А не указывается, поскольку они всегда высококачественные (или особо высококачественные).

Некоторые группы сталей специального назначения содержат дополнительные обозначения: марки шарикоподшипниковых сталей начинаются с буквы Ш, быстрорежущих — с буквы Р, магнитно-твердых — с буквы Е, автоматных — с буквы А. Более подробно о маркировке таких сталей будет сообщено в соответствующих разделах.

2.1.2.7. Конструкционные стали и сплавы

Общими потребительскими требованиями к конструкционным сталям являются наличие у них определенного комплекса механических свойств, обеспечивающего длительную и надежную работу материала в условиях эксплуатации, и хороших технологических свойств (обрабатываемости давлением, резанием, закаливаемости, свариваемости и др.). Необходимые технологические и потребительские свойства конструкционных сталей и сплавов в основном обеспечиваются рациональным выбором химического состава, улучшением металлургического качества, соответствующей термической обработкой и поверхностным упрочнением.

Конструкционные стали и сплавы классифицируются по назначению на *строительные (арматурные)* и *машиностроительные*, а последние в свою очередь подразделяются на группы *общего* и *специального назначения*. С некоторой условностью эти стали также различают по прочности: *стали нормальной прочности* ($\sigma_B < 1000$ МПа), *стали повышенной прочности* ($\sigma_B < 1500$ МПа) и *высокопрочные стали* ($\sigma_B > 1500$ МПа).

Конструкционные строительные стали и сплавы. Свойства этих сталей и сплавов определяются в основном механическими (предел прочности, относительное удлинение, твердость, ударная вязкость) и технологическими (жидкотекучесть, свариваемость, ковкость и др.) характеристиками. Для конструкционных строительных сталей и сплавов используются *углеродистые* (0,10...0,20% С) и *низколегированные* (Si, Mn, Cr и др.) *стали* (ГОСТ 19281—89 и 19282—72). Эти стали, как правило, обыкновенного качества и поставляются по механическим свойствам.

Целью легирования этих сталей является повышение закаливаемости и вследствие этого обеспечение более высоких механических свойств (глав-

ным образом предела текучести) в процессе охлаждения при прокатке. Применение низколегированных сталей взамен углеродистых позволяет сэкономить 15...30% металла. Для того чтобы упрочнение не сопровождалось излишним снижением вязкости, пластичности и свариваемости, содержание углерода и легирующих элементов в строительных сталях ограничивается. Достоинством низколегированных малоуглеродистых сталей является также их хорошая свариваемость.

В соответствии с ГОСТ 27772—88 конструкционные углеродистые стали подразделяют на несколько классов по прочности. Маркируют их буквой С и числом, указывающим предел текучести в мегапаскалях: С2135, С285, ... , С590. В конце марки могут стоять буквы К, Т или Д, обозначающие:

К — отличие в химическом составе от стали такого же класса прочности;

Т — упрочнение термообработкой;

Д — введение в сталь 0,15—0,3% Си для повышения сопротивления атмосферной коррозии.

Конструкционные низколегированные стали разделяют на *стали повышенной прочности* ($\sigma_T \geq 285$ МПа) и *высокопрочные* ($\sigma_T \geq 440$ МПа).

Конструкционные строительные стали в виде листов, сортового фасонного проката применяют в строительстве и машиностроении для сварных конструкций, в основном без дополнительной термической обработки. Так, стали 14Г2, 18Г2, 16ГС, 10Г2С1, 14ХГС и 15ХСНД используются для изготовления металлических конструкций, а стали 18Г2С, 25Г2С и 35ГС — для армирования железобетонных конструкций. Конструкционные строительные стали поставляют в виде прутков, профилей, листов и широких полос. Кроме того, из этой стали изготавливают заклепки, болты, гайки, шайбы, винты, гвозди, поковки, а также стальные канаты.

Конструкционные машиностроительные стали и сплавы общего назначения. Основным потребительским требованием к конструкционным машиностроительным сталям и сплавам общего назначения является наличие определенного комплекса механических свойств с их заданным распределением по сечению изделия. Комплекс механических свойств, если не предъявляются какие-либо специальные требования, включает характеристики прочности, пластичности, удельной работы деформации и разрушения (ударной вязкости).

Химический состав этих сталей такой (ГОСТ 1050—88 и 4543—71): мало- и среднеуглеродистые — содержат от 0,05 до 0,65% С, а низко- и среднелегированные — Mn, Si, Cr, Ni и др.

Большинство конструкционных легированных сталей относятся к перлитному классу, а в равновесном состоянии — к классу доэвтектоидных. Легирующие элементы определяют преимущественно закаляемость

и прокаливаемость и в меньшей степени — механические свойства (кроме никеля и молибдена, улучшающих вязкость). Наиболее широко применяются марки 30ХГСН2А, 30ХГСН2МА, 25Х2ГНТРА, 30Х2ГСН2ВМ и 40ХН2СМА.

Конструкционные машиностроительные стали и сплавы общего назначения классифицируются по способу упрочнения как *стали без термической обработки*, *упрочняемые в поверхностном слое* и *упрочняемые по всему объему*.

Рекомендуемыми режимами термической обработки конструкционных углеродистых качественных сталей в зависимости от условий эксплуатации изделий являются нормализация, закалка с отпуском, поверхностная закалка с отпуском.

Стали (08кп, 10кп, 15кп, 08, Ст3), используемые без термической обработки, поставляют главным образом в листах. Они должны иметь пониженное содержание углерода и кремния, что обеспечивает их хорошую деформируемость (штампуемость, вытяжка, выдавливание и др.) в холодном состоянии. Штампуемость листовой стали ухудшается при наличии в ней крупного и неоднородного по размерам зерна, третичного цементита и других структурных неоднородностей. Для холодной штамповки из листовой стали в автомобилестроении используются стали 09Г2С, 09Г2, 16ГФР, 12ХМ и др.

При требовании высокой прочности поверхностного слоя используют нитроцементуемые, цементуемые, азотируемые, а также закаливаемые и с пониженной прокаливаемостью (упрочняемые в поверхностном слое) стали. Так, в качестве цементуемой углеродистой стали используются качественные и высококачественные стали марок 15, 20. После цементации, заковки в воде и низкого отпуска поверхность стали имеет высокую твердость (HRC 58...62), обеспечиваемую мартенситной структурой, а сердцевина не упрочняется, так как в ней сохраняется ферритно-перлитная микроструктура.

Легированные цементуемые стали (15Х, 15ХА, 15ХФ, 12ХН3А, 12Х2Н4А, 20ХГНР, 18ХГТ и др.) применяют для деталей, более сильно напряженных, а также более крупных размеров и сложной формы — валов, осей, шестерен и др. Легирование в этом случае обеспечивает лучшую прокаливаемость при более прочной сердцевине. В сердцевине образуются структуры бейнита или низкоуглеродистого мартенсита (HRC 30...45).

Для получения высоких прочностных свойств по всему объему изделия применяют улучшение, т.е. закалку в масле и высокий (550...650°C) отпуск. При такой обработке улучшаемая сталь имеет структуру зернистого сорбита, обеспечивающую наилучшее сочетание прочности и вязкости. К улучшаемым сталям относятся стали, содержащие $\approx 0,35\%$ С (углеродистые и малолегированные) и 0,2...0,3% С (средне- и высоколегированные).

Способность упрочняться на ту или иную глубину при одинаковом содержании углерода определяется влиянием легирующих элементов, но при небольших сечениях изделий это влияние менее заметно, а в деталях крупного размера у углеродистых и менее легированных сталей механические свойства значительно ниже. Поэтому выбор марки стали зависит как от

уровня требуемых свойств, так и от толщины изделия, например при диаметре до 12...15 мм — стали 35, 40, 45, 50; до 50...75 мм — 40ХН, 25ХГСА, 30ХГС; 75...120 мм — 30ХН3А, 40ХН2МА. Из сталей, упрочняемых по всему сечению, изготавливают оси, валы, шестерни, кривошипы, шпильки ответственного назначения, тонкостенные трубы и др.

Конструкционные машиностроительные стали и сплавы специального назначения. Специальное назначение этих сталей и сплавов определяется требованием к конкретному комплексу механических, физических, физико-химических и технологических свойств, необходимому для эксплуатации изделий в строго определенных условиях, например при очень высоких напряжениях, низких или повышенных температурах, динамических или гидроабразивных нагрузках, для специального назначения в приборах и аппаратах электро- и радиотехнической промышленности.

В зависимости от химического состава сплавы этой группы подразделяют на классы по основному составляющему элементу:

- *сплавы на железоникелевой основе;*
- *сплавы на никелевой основе.*

Классификация машиностроительных сталей и сплавов по основному потребительскому свойству имеет следующие группы: *особо высокой прочности и вязкости, коррозионностойкие, износостойкие, пружинные, автоматные, шарикоподшипниковые и литейные.*

Стали особо высокой прочности и вязкости (мартенситно-стареющие) по химическому составу являются безуглеродистыми (менее 0,03% С) и высоколегированными (Ni, Co, Mo, Cr, Ti, Вe и др.). Эти стали характеризуются следующими потребительскими свойствами: $\sigma_{\text{в}} = 1800...3000$ МПа; $\delta > 10\%$, $\psi > 40\%$; $KCU = 0,3...2,5$ кДж/м².

Технологические свойства мартенситно-стареющих сталей повышенные: хорошие свариваемость, обрабатываемость резанием и пластичность в закаленном состоянии; незначительная деформация деталей при отпуске, выполняемом после резания и создающем необходимые высокие механические свойства. Мартенситно-стареющим сталям можно придать стойкость против коррозии и теплостойкость. Так, при дополнительном легировании хромом ($\approx 12\%$) эти стали становятся стойкими против коррозии даже в сильно агрессивных средах (морской воде, кислотах и др).

Мартенситно-стареющие стали — особо высококачественные и из-за высокой стоимости применяются для изготовления деталей наиболее ответственного назначения: Н18К9М5 — шестерен, валов, корпусов ракет; Н10Х12Д2Т — деталей химической аппаратуры, пружин; Н4Х12К15М4Т — штампов горячего деформирования, деталей теплоэнергетических установок и др.

Коррозионностойкие стали и сплавы (ГОСТ 5632—72), в том числе высоколегированные, обладают достаточной стойкостью против коррозии только в ограниченном числе сред. Они обязательно имеют в своем составе более 12,5% Cr, роль которого состоит в образовании на поверхности изделия защитной (пассивной) оксидной пленки, прерывающей контакт с агрессивной средой. При этом лучшей стойкостью против коррозии обладают те стали и сплавы, в которых все содержание хрома приходится на долю твердого раствора. Содержание углерода должно быть небольшим, чтобы уменьшить переход хрома в карбиды, так как это может снизить концентрацию хрома в защитной пленке. Для предотвращения выделений карбидов хрома используют также быстрое охлаждение из области γ -твердого раствора или легирование титаном, ванадием, ниобием или цирконием для связывания углерода в более устойчивые карбиды.

Физико-химические свойства коррозионностойких сталей меняются в довольно широком диапазоне в зависимости от структуры. Для наиболее характерных сплавов этого назначения она может быть:

- ферритно-карбидной и мартенситной (12X13, 20X13, 20X17H2, 30X13, 40X13, 95X18 — для слабых агрессивных сред (воздуха, воды, пара));
- ферритной (15X28) — для растворов азотной и фосфорной кислот;
- аустенитной (12X18H10T) — в морской воде, органических и азотной кислотах, слабых щелочах;
- мартенситно-стареющей (10X17H13M3T, 09X15H8Ю) — в фосфорной, уксусной и молочных кислотах. Сплав 06XH28MT может эксплуатироваться в условиях горячих (до 60°C) фосфорной и серной (концентрации до 20%) кислот. Коррозионная стойкость сталей может быть повышена термической обработкой (закалкой и высоким отпуском) и созданием шлифованной поверхности.

Коррозионностойкие стали и сплавы классифицируют в зависимости от агрессивности среды, в которой они используются, и по их основному потребительскому свойству на собственно *коррозионностойкие*, *жаростойкие*, *жаропрочные* и *криогенные*.

Изделия из собственно коррозионностойких сталей (лопатки турбин, клапаны гидравлических прессов, пружины, карбюраторные иглы, диски, валы, трубы и др.) работают при температуре эксплуатации до 550°C. Для жаростойких и жаропрочных машиностроительных сталей используются малоуглеродистые (0,1...0,45% C) и высоколегированные (Si, Cr, Ni, Co и др.).

Жаростойкие стали и сплавы получают на базе системы Fe + Cr + Ni с небольшим количеством кремния. Основным потребительским свойством этих сталей является температура эксплуатации, которая должна быть более 550°C. Жаростойкие стали устойчивы против газовой коррозии до 900...1200°C

в воздухе, печных газах, в том числе серосодержащих (15X5, 15X6СМ, 40X9C2, 30X13H7C2, 12X17, 15X28), окислительных и науглераживающих (20X20H14C2) средах, но могут проявлять ползучесть при приложении больших нагрузок.

Жаростойкие стали характеризуют по температуре начала интенсивного окисления. Величина этой температуры определяется содержанием хрома в сплаве. Так, при 15% Cr температура эксплуатации изделий составляет 950°C, а при 25% Cr — 1300°C. Жаростойкость зависит от химического состава стали, а не от ее структуры, поэтому жаростойкость ферритных и аустенитных сталей при равном количестве хрома практически одинакова.

Жаростойкие стали и сплавы используются для производства труб, листов, деталей высокотемпературных установок, газовых турбин и поршневых двигателей, печных конвейеров, ящиков для цементации и др.

Жаропрочные стали должны обладать высоким сопротивлением химической коррозии, но вместе с тем обеспечивать надежную работу под нагрузкой (т.е. иметь достаточно высокие пределы ползучести и длительной прочности) при температурах эксплуатации выше 400...450°C. Температурный уровень жаропрочности сплавов в первую очередь определяется прочностью межатомной связи, которая может быть оценена рядом физических констант, в том числе температурой плавления. Однако при данной температуре плавления жаропрочность сильно зависит от температуры рекристаллизации. В связи с этим стали аустенитного класса имеют более высокую жаропрочность по сравнению со сталями перлитного класса.

При таких высоких температурах эксплуатации определяющую роль в разрушении играет не дислокационная структура, а диффузионные процессы, имеющие даже при небольших напряжениях направленный характер и способствующие развитию диффузионной ползучести. Так как диффузионные процессы легче всего протекают по границам зерен, имеющих повышенное количество дефектов строения, то кроме химического состава на жаропрочность существенное влияние оказывает структура металла. Обычно добиваются получения легированного твердого раствора с вкраплениями по границам зерен или внутри них дисперсных карбидных или интерметаллидных фаз. Более крупное зерно способствует повышению жаропрочности, хотя при этом снижается пластичность. Чрезвычайно важный фактор — стабильность структуры, так как перемещение атомов ведет к увеличению ползучести.

Жаропрочные стали и сплавы в своем составе обязательно содержат никель, который обеспечивает существенное увеличение предела длительной коррозионной прочности при незначительном увеличении предела текучести и временного сопротивления, и марганец. Они могут дополнительно легироваться молибденом, вольфрамом, ниобием, титаном, бором, иодом и др. Так, микролегирование бором, а также редкоземельными и некоторыми щелочно-земельными металлами повышает такие характеристики, как число оборотов при кручении, пластичность и вязкость при высоких температурах. Механизм этого воздействия при микролегировании основан на рафинировании границ зерна и повышении межкристаллитной прочности. Химический состав и структура этих сталей весьма разнообразны.

Рабочие температуры современных жаропрочных сплавов составляют примерно $0,45...0,8 T_{пл}$. Эти стали классифицируют по температуре эксплуатации (ГОСТ 20072—74): при $400...550^{\circ}\text{C}$ — 15ХМ, 12Х1МФ, 25Х2М1Ф, 20Х3МВФ; при $500...600^{\circ}\text{C}$ — 15Х5М, 40Х10С2М, 20Х13; при $600...650^{\circ}\text{C}$ — 12Х18Н9Т, 45Х14Н14В2М, 10Х11Н23Т3МР, ХН60Ю, ХН70Ю, ХН77ТЮР, ХН56ВМКЮ, ХН62МВКЮ.

Жаропрочные стали и сплавы применяются для изготовления труб, клапанных, паро- и газотурбинных деталей (роторы, лопатки, диски и др.).

Криогенные машиностроительные стали и сплавы (ГОСТ 5632—72) по химическому составу являются низкоуглеродистыми (0,10% С) и высоколегированными (Cr, Ni, Mn и др.) сталями аустенитного класса (08Х18Н10, 12Х18Н10Т, 03Х20Н16АГ6, 03Х13АГ19 и др.). Основными потребительскими свойствами этих сталей являются пластичность и вязкость, которые с понижением температуры (от 20 до -196°C) либо не меняются, либо мало уменьшаются, т.е. не происходит резкого снижения вязкости, характерного при хладноломкости. Например, для криогенных сталей (ОН6А, ОН9А) после соответствующей термической обработки (двойная нормализация и отпуск или закалка в воде и отпуск) характерно при понижении температуры повышение предела ползучести от 400 до 820 МПа. Криогенные машиностроительные стали классифицируются по температуре эксплуатации в диапазоне от -196 до -296°C и используются для изготовления деталей криогенного оборудования.

Износостойкие стали (ГОСТ 5632—72) по химическому составу могут быть высокоуглеродистыми (1,1...1,3% С) или малоуглеродистыми и высоколегированными (Si, Mn, Cr, Ni и др.). Основное потребительское свойство этих сталей — высокая стойкость деталей при кавитационной коррозии и механическом изнашивании при значительных ударных нагрузках. Эти стали (12Х18Н9Т, 30Х10Г10, 0Х14АГ12, 0Х14АГ12М, Г13) применяют чаще в литом или ковном (катанном) состоянии, так как их общее технологическое свойство — пониженная обрабатываемость резанием. Износостойкие стали используются для изготовления лопастей гидротурбин и гидронасосов, крестовин рельсов, щек дробилок, черпаков землеройных машин, траков и др.

Пружинные стали и сплавы (ГОСТ 14959—79) — среднеуглеродистые (0,6...0,8% С), низколегированные (Mn, Si, Cr, Ni и др.) стали, обладающие высокими механическими свойствами, в первую очередь высокими пределами упругости и прочности, а также повышенной релаксационной стойкостью при достаточной вязкости и пластичности. Для получения этих свойств стали должны содержать более 0,5% С и быть способными к термической обработке — закалке и отпуску. Пружинные стали (65Г, 70, 75; 50ХА, 55ХГР, 55С2, 60С2, 50ХФА, 60С2ХФА, 65С2ВА, 70С2ХА) в основном используются для изготовления пружин и рессор.

Кроме рассмотренных выше пружинных сталей общего назначения в машиностроении широко применяются *пружинные стали специального*

назначения, к которым помимо требования высоких механических свойств могут предъявляться дополнительные требования по физико-химическим свойствам: немагнитности, коррозионной стойкости, низкому или постоянному температурному коэффициенту модуля упругости и др.

Автоматные стали (ГОСТ 1414—75) содержат 0,08...0,45% С и повышенное содержание серы (0,05...0,3%), фосфора (0,05...0,16%) и часто марганца (0,6...1,55%). Обогащение границ зерен феррита растворенным в нем фосфором и образование на них хрупких включений (MnS и др.) облегчают резание, способствуют дроблению и легкому отделению стружки, обеспечивая чистоту обрабатываемой поверхности. Срок службы режущего инструмента при обработке автоматных сталей увеличивается. Улучшение обрабатываемости стали достигается также микролегированием свинцом, селеном, кальцием. Однако введение этих элементов снижает прочностные характеристики сталей, поэтому их применяют для изготовления малоответственных деталей, от которых не требуется высоких механических свойств.

Автоматные стали получили свое наименование в связи с их обработкой на станках-автоматах с повышенной скоростью резания, предназначенных для изготовления деталей массового спроса (шайб, болтов, гаек, шпилек и некоторых других деталей автомобилестроения). В обозначении марки первая буква А указывает, что сталь автоматная; цифры в ней показывают содержание углерода в сотых долях процента (например, А11, А40Г). Присутствие свинца обозначается буквой С (например, АС35Г2), кальция — буквой Ц (АЦ45Х, АЦ40Г2 и др.), селена — буквой Е (А35Е, А40ХЕ и др.).

Шарикоподшипниковые стали (ГОСТ 80—78) по химическому составу должны быть высокоуглеродистыми (0,95...1,05% С), низколегированными (Сг, Si, Mn и др.). Жесткие требования (ГОСТ 801—78 и ГОСТ 21022—75) предъявляются к чистоте по неметаллическим включениям, карбидной сетке, карбидной ликвации, рыхлости и пористости металла. Микроструктура стали в рабочем состоянии — мелкоиглочатый (скрытокристаллический) мартенсит с равномерно распределенными округлыми включениями карбидов. Основные потребительские свойства этих сталей — повышенные твердость (61...65 HRC), износостойкость и сопротивление контактной усталости.

Шарикоподшипниковые хромистые стали обозначаются буквами ШХ в начале марки; содержание хрома в этих сталях указывается в десятых долях процента после буквенного обозначения (ШХ4, ШХ15, ШХ15СГ и др.). В конце марки может быть указан вид металлургического переплава: Ш — электрошлаковый (ШХ15Ш); ВД — вакуумно-дуговой (ШХ15ВД).

Литейные стали содержат до 0,9% Mn, до 0,52% Si и не более 0,06% S и 0,08% P. При затвердении отливок формируются крупные зерна аустенита, внутри которых при последующем охлаждении в сталях с содержанием углерода менее 0,4% образуются направленные пластины избыточного феррита (*видманштеттова структура*). С увеличением содержания углерода доля феррита, образующего видманштеттову структуру уменьшается, а доля феррита в виде равноосных зерен возрастает. Литая сталь с видманштеттовой структурой имеет низкие пластичность и ударную вязкость, и для повышения величин этих свойств отливки из сталей, содержащих менее 0,4% C, подвергают полному отжигу или нормализации.

Литейные свойства сталей значительно хуже, чем чугунов и большинства литейных цветных сплавов. Трудности при литье создают высокая температура плавления, низкая жидкотекучесть, большая линейная усадка (до 2,3%) и склонность к образованию горячих литейных трещин.

Низкоуглеродистые литейные стали применяют для изготовления деталей, подвергающихся ударным нагрузкам; арматуры; деталей сварно-литых конструкций. Среднеуглеродистые литейные стали применяют для отливки станин и валков прокатных станов, крупных шестерен, зубчатых колес. Стальные отливки часто подвергают термической обработке для уменьшения литейных напряжений.

Литейные легированные стали по свойствам уступают углеродистым сталям из-за того, что при легировании расширяется интервал кристаллизации и уменьшается теплопроводность и, следовательно, возрастают термические напряжения. Литейные легированные стали подразделяют на *конструкционные* (ГОСТ 977—88) и *высоколегированные со специальными свойствами*.

Многие литейные стали имеют ту же марку, что и деформируемые, отличаясь лишь буквой Л в конце марки (15Л, 20Л, 25Л, 30Л, 35Л, 40Л, 45Л, 50Л и 35ХМЛ, 35ХГСЛ, 12Х18Н9ТЛ и др.). В этом случае химический состав литейной стали практически такой же, как деформируемой, и различается лишь допустимое количество вредных примесей (в литейной стали оно несколько больше). Однако немало легированных сталей разработано специально в качестве литейных и не имеет аналога среди деформируемых (например, сталь 20ФЛ, применяемая для отливки крупногабаритных деталей грузовых вагонов, и сталь 08ГДНФЛ — для изготовления ответственных крупных деталей в судостроении, работающих до 60°C).

2.1.2.8. Инструментальные стали и сплавы

Инструментальные стали и сплавы — литые твердые сплавы.

Твердые сплавы — материалы с высокими твердостью, прочностью, режущими и другими свойствами, сохраняющимися при нагреве до вы-

соких температур. Различают *литые* и *спеченные (порошковые) твердые сплавы*.

Инструментальные стали предназначены для изготовления режущего и измерительного инструмента, штампов холодного и горячего деформирования, а также ряда деталей точных механизмов и приборов: пружин, подшипников качения, шестерен и др. Часто из таких сталей изготавливают только рабочую (режущую) часть инструмента, а крепежные части выполняют из конструкционных сталей.

Основными потребительскими требованиями к инструментальным сталям являются высокие твердость, износостойкость и прочность при хорошей ($500\ldots 800^\circ\text{C}$) теплостойкости. Кроме эксплуатационных свойств для инструментальных сталей большое значение имеют технологические свойства: прокаливаемость, малые объемные изменения при закалке, обрабатываемость давлением, резанием, шлифуемость.

Необходимые свойства инструментальным сталям придают карбидные фазы, так как именно их присутствие обуславливает высокие прочностные показатели и твердость (рис. 55).

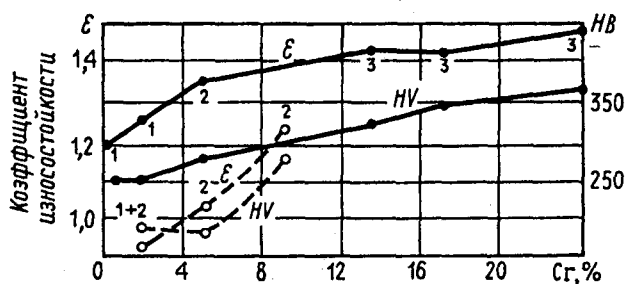


Рис. 55. Влияние содержания хрома и типа карбидов в хромистых сталях на твердость HB и износостойкость при трении по абразиву.

Штриховые линии — сплавы, содержащие 0,4% C; сплошные линии — сплавы, содержащие 1% C; 1 — Fe_3C ; 2 — Cr_7C_3 ; 3 — Cr_{23}C_6

Для обеспечения необходимых свойств применяют специальное легирование и термическую обработку. Так, обеспечение теплостойкости достигается легированием сталей вольфрамом, молибденом, ванадием, а легирование хромом и марганцем повышает их прокаливаемость. Термическая обработка инструментальных сталей, как правило, включает закалку и низкий отпуск. В результате такой обработки получают твердость сталей $60\ldots 65 \text{ HRC}$ и предел прочности при изгибе $\sigma_{\text{и}} = 250\ldots 350 \text{ МПа}$. Режимы термической обработки в зависимости от химического состава сталей и требований к их твердости и прочности установлены ГОСТ 5950—73 и 19265—73.

Инструментальные стали классифицируются (ГОСТ 1435—90 и 5950—73) по основному потребительскому свойству на *стали высокой*

твердости, повышенной вязкости и теплостойкие. Стали высокой твердости и повышенной вязкости используются как нетеплостойкие.

Инструментальные стали высокой твердости по химическому составу могут быть высокоуглеродистыми (0,68...1,35% С) и низколегированными (Mn, Si, Cr и др.). Структура этих сталей после термообработки — мартенсит и перлит. Температуры эксплуатации изделий из таких сталей — до 190...225°C, при этом их твердость равна 60...68 HRC.

Инструментальные стали высокой твердости (У10...У13, У10А...У13А, 13Х, ХВСГ, 9ХФ, 7ХГ2ВМ и др.) делят по прокаливаемости на *стали небольшой, повышенной и высокой прокаливаемости*. Величина прокаливаемости определяет размер изделия. Так, инструментальные стали небольшой прокаливаемости используют для изготовления тонкого инструмента диаметром менее 12...15 мм, а стали высокой прокаливаемости — для массивного инструмента и инструмента сложной формы.

Стали повышенной вязкости по химическому составу являются среднеуглеродистыми (0,60...0,74% С) и среднелегированными (Mn, Si, Cr и др.). Температура эксплуатации изделий из этих сталей, как правило, менее 200°C, а их твердость — 62 HRC. Стали повышенной вязкости (У7, У7А, 7ХФ, 6ХС) используются для изготовления инструментов для обработки древесины (пилы, ножи и др.).

Инструментальные теплостойкие стали по температуре эксплуатации в свою очередь делят на стали собственно *теплостойкие* (500...800°C) и *полутеплостойкие* (до 500°C). По химическому составу эти стали являются углеродистыми (0,22...1,65% С), высоколегированными (Mn, Si, Cr, W, Mo и др.).

Теплостойкие стали высокой твердости объединяют в группу так называемых *быстрорежущих сталей*, маркируемых по ГОСТ 19265—73. Буква Р в марке обозначает «режущие». После буквы Р следует цифра, указывающая среднее содержание в процентах вольфрама — главного легирующего элемента этих сталей (буква В — его условное обозначение — пропускается); затем, как и в остальных сталях, буквами обозначаются другие легирующие элементы с цифрами, указывающими их содержание в процентах, если это содержание больше 1...2%. В состав всех быстрорежущих сталей непременно входят углерод (0,8...1,25%), хром (около 4%) и ванадий (1...2%), содержание которых в марке не указывается.

Фазовый состав быстрорежущих сталей в отожженном состоянии представлен легированным ферритом и карбидами M_6C , $M_{23}C_6$, MC , M_3C . Основным карбидом является M_6C . Количество карбидной фазы в стали Р18 достигает 25...30%, а в стали Р6М5 — 22%.

Обработка быстрорежущих сталей включает горячую ковку литых заготовок, отжиг, закалку и многократный (чаще трехкратный) отпуск.

Структура после закалки — мартенсит + карбиды + остаточный аустенит. Отпуск вызывает превращение остаточного аустенита в мартенсит и дисперсионное твердение. Это сопровождается увеличением твердости до HRC 64 (вторичная твердость) за счет выделения частиц цементита. Для улучшения режущих свойств и повышения износостойкости некоторые виды инструментов подвергают низкотемпературному (540...570°C) цианированию, в результате которого на поверхности стали образуется тонкий слой высокой твердости (1000...1100 HV).

Полутеплостойкие (X12M, 5XNM) и теплостойкие (P12, P6M5, P18; P12Ф3, P13Ф4K5, P9M4K8; B11M7K23, 4X5MФC, 4X5B2ФC, 4X4BMФC, 45X3B3MФC, 2X8B8M2K8) стали используются для изготовления режущих инструментов (например, фрезы, сверла), штампов, пуансонов. Для инструментальных сталей при температуре эксплуатации до 650°C твердость должна быть 60...62 HRC, а для штамповых при температуре до 700°C — 45...52 HRC.

Инструментальные стали, используемые для изготовления измерительного инструмента (плиток, калибров, шаблонов), помимо твердости и износостойкости должны обеспечивать постоянство размеров этих инструментов и хорошо шлифоваться. Обычно используют стали У8...У12, Х, ХВГ, Х12Ф1. Необходимые требования обеспечиваются обработкой холодом до -60°C (нередко многократной) и отпуском при 120...130°C непосредственно после закалки.

Измерительные скобы, шкалы, линейки и другие плоские и длинные инструменты изготавливают из листовых сталей 15, 15Х. Для получения рабочей поверхности с высокими твердостью и износостойкостью инструменты подвергают цементации и закалке.

2.1.2.9. Стали и сплавы с особыми физическими свойствами

К сталям и сплавам с особыми физическими свойствами относятся те, работоспособность которых оценивается не только по механическим, но и по ряду других (теплофизических, магнитных, электрических и др.) свойств требуемого уровня. Стали и сплавы с особыми физическими свойствами часто называют *прецизионными*.

Прецизионные сплавы — металлические сплавы с особыми физическими свойствами (магнитными, электрическими, тепловыми, упругими) или редким сочетанием свойств, уровень которых в значительной степени обусловлен точностью химического состава, отсутствием примесей, тщательностью изготовления и обработки.

Диапазон использования таких сталей и сплавов очень широкий. Наибольшее распространение имеют стали и сплавы:

- с заданным температурным коэффициентом расширения;
- с высоким электросопротивлением (при повышенной жаростойкости);
- магнитные.

Стали и сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения (ГОСТ 10994—74) предназначены для впаивания изделий на их основе в стеклянные и керамические корпуса вакуумных приборов. Химический состав этих сплавов базируется на системе Fe + Ni + Co с небольшим количеством меди. Точный состав каждого сплава устанавливается для конкретного вида стекла или керамики, используемых в изделиях, из условия равенства их температурных коэффициентов линейного расширения. Например, сплав 29НК (29% Ni, 18% Co, остальное — Fe) с $\alpha = (4,6...5,5) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, называемый *коваром*, предназначен для вакуумных впаев в молибденовые стекла. Для изготовления деталей, спаиваемых со стеклом (например, в телевизионных кинескопах), применяют более дешевые ферритные железохромистые сплавы 18ХТФ и 18ХМТФ, имеющие $\alpha = 8,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Особое место занимают сплавы с малым коэффициентом линейного расширения, существенно не меняющимся в высокотемпературной области. Эти сплавы предназначены для изготовления деталей измерительных приборов и технических средств. Промышленное значение имеет сплав *инвар* на базе железа и никеля (36%) с небольшим количеством углерода (0,05%). Для этого сплава $\alpha = (1...1,5) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, причем изменение величины коэффициента при температурах 600...700°C происходит очень плавно за счет ферромагнитного эффекта. Эти сплавы используют для изготовления деталей, впаиваемых в неорганические диэлектрики — стекло, керамику, слюду и др.

Стали и сплавы с высоким электросопротивлением (ГОСТ 10994—74) должны сочетать высокое сопротивление (1,06...1,47 мкОм·м, что более чем в 10 раз выше, чем у низкоуглеродистой стали) и жаростойкость (1000...1350°C). К технологическим свойствам таких сплавов предъявляются требования высокой пластичности, обеспечивающей хорошую деформируемость на прутки, полосу, проволоку и ленты, в том числе малых сечений, а к потребительским — малой величины температурного коэффициента линейного расширения. Для этих сплавов используются системы Fe + Cr + Al, Fe + Ni + Cr и Ni + Cr. Их микроструктура представляет собой твердые растворы с высоким содержанием легирующего элемента. Чем больше в сплавах хрома и алюминия, тем выше их жаростойкость. Количество углерода в сплавах строго ограничивают (0,06...0,12%), так как появление карбидов снижает пластичность и сокращает срок эксплуатации изделий.

Наибольшее распространение в технике получили сплавы ферритного класса: Х13Ю4 (*фехраль*), 0Х23Ю5 (*хромель*) и 0Х27Ю5А. Эти сплавы малопластичные, поэтому изделия из них, особенно крупные, выполняют при подогреве до 200...300°C. Сопротивление ползучести ферритных сплавов невелико, и нагреватели при высоких температурах (1150...1200°C) нередко провисают под действием собственного веса.

Высоким электросопротивлением обладают сплавы на основе никеля — Х20Н80 (*нихромы*). Нихромы с железом называют *ферронихромами*, например сплав Х15Н60, содержащий 25% Fe. Ферронихромы обладают более высокими технологическими свойствами и дешевле, чем нихромы.

Стали и сплавы с высоким электросопротивлением предназначены для изготовления деталей и элементов нагревательных приборов, реостатов, а также резисторов, терморезисторов, тензодатчиков и др.

Магнитные стали и сплавы делят на *магнитно-твердые*, *магнитно-мягкие* и *парамагнитные*.

Магнитно-твердые стали и сплавы (ГОСТ 17809—72) по своим потребительским свойствам характеризуются высокими коэрцитивной силой и остаточной индукцией и, соответственно, высокой магнитной энергией ($B_r H_c$)_{max}.

В зависимости от химического состава используемые в промышленности магнитно-твердые стали и сплавы представляют собой:

- высокоуглеродистые стали (1,2...1,4% C);
- высокоуглеродистые (1% C) сплавы железа с хромом (до 2,8%), легированные кобальтом;
- высокоуглеродистые сплавы железа, алюминия, никеля и кобальта, называемые *алнико*.

Легированные элементы повышают главным образом коэрцитивную силу и магнитную энергию, а также улучшают температурную и механическую стабильности постоянного магнита.

В углеродистых магнитно-твердых сталях необходимые свойства ($H_c = 65$ Э) обеспечиваются неравновесной мартенситной структурой с высокой плотностью дефектов. В сплавах железа с хромом (например, ЕХ3) высокие потребительские свойства обеспечивают магнитная и кристаллографическая текстуры, получаемые в результате термообработки, включающей нормализацию и высокий отпуск или закалку и низкий отпуск. Наиболее высокие свойства ($H_c = 500$ Э), достигаемые в сплавах алнико, реализуются за счет выделения интерметаллида NiAl и наличия магнитной и кристаллографической текстур. Для сплавов алнико применяют при термообработке нагрев до 1300°C с последующим охлаждением со скоростью 0,5...5°C/с в магнитном поле.

Магнитно-твердые стали обозначают индексом Е, указывая далее буквой и цифрой наличие хрома и его содержание в целых процентах (например, ЕХ2, ЕХ3).

Из магнитно-твердых сталей и сплавов изготавливают различного рода постоянные магниты. В промышленности наиболее широко применяют сплавы типа алнико (ЮНДК15, ЮН14ДК25А, ЮНДК31ТЗБА и др.). Эти сплавы тверды, хрупки и не поддаются деформации, поэтому

магниты из них изготавливают литьем. После литья проводят только шлифование.

Магнитно-мягкие стали и сплавы отличаются легкой намагничиваемостью в относительно слабых магнитных полях. Их основными потребительскими свойствами являются высокая магнитная проницаемость, низкая коэрцитивная сила, малые потери на вихревые токи и при перемагничивании. Эти свойства обеспечивает гомогенная (чистый металл или твердый раствор) структура без примесей. Для устранения внутренних напряжений магнитно-мягкие материалы должны быть полностью рекристаллизованы, так как даже слабый наклеп существенно снижает магнитную проницаемость и повышает коэрцитивную силу. При микроструктуре из более крупных зерен магнитная проницаемость возрастает.

По химическому составу применяемые в промышленности магнитно-мягкие (электротехнические) стали и сплавы делятся на:

- низкоуглеродистые (0,05...0,005% С) с содержанием кремния 0,8...6,0%;
- сплавы железа с никелем.

В низкоуглеродистых сталях кремний, образуя с α -Fe твердый раствор, увеличивает электрическое сопротивление и, следовательно, уменьшает потери на вихревые токи; кроме того, кремний повышает магнитную проницаемость, немного снижает коэрцитивную силу и потери на гистерезис вследствие вызываемого им роста зерна, графитизирующего действия и лучшего раскисления сталей. Однако кремний понижает индукцию в сильных магнитных полях и повышает хрупкость, особенно при его содержании 3...4%.

Железоникелевые сплавы с содержанием никеля 36...83%, называемые *пермаллоями*, обладают лучшими потребительскими свойствами. Для обеспечения тех или иных характеристик в их состав вводят хром, молибден, медь и др. Величина магнитной проницаемости этих сплавов превосходит аналогичные показатели для низкоуглеродистых сталей в $15 \cdot 10^3$ раз. Пермаллои — легко деформируемые сплавы. Однако деформация значительно ухудшает их первоначальные магнитные характеристики. Для восстановления свойств проводят термообработку по строго разработанному режиму: скорость нагрева (до 900...1000 °С), выдержка и скорость охлаждения. Пермаллои применяют в аппаратуре, работающей в слабых частотных полях (телефон, радио).

Для электротехнических сталей (ГОСТ 21427—83) принята маркировка, основанная на кодировании. В обозначении марки используют четыре цифры, причем их значения соответствуют кодам, содержащим следующую информацию:

первый — структура материала (по наличию и степени текстуры) и вид прокатки (горячая или холодная деформация);

второй — химический состав по содержанию кремния;

третий — величины потерь тепловых и на гистерезис;
четвертый — значение нормируемого потребительского свойства.

Электротехнические стали изготавливают в виде рулонов, листов и резанной ленты. Они предназначены для изготовления магнитопроводов постоянного и переменного тока, якорей и полюсов электротехнических машин, роторов, статоров, магнитных цепей трансформаторов и др.

Парамагнитными сталями являются аустенитные стали 12Х18Н10Т, 17Х18Н9, 55Г9Н9Х3, 40Г14Н9Ф2 и др. Их химический состав базируется на системе Fe + Cr + Ni + Ti. Основными потребительскими свойствами являются немагнитность и высокая прочность. Необходимая прочность достигается при деформационном и дисперсионном упрочнении изделий. К недостаткам этих сталей и сплавов следует отнести низкий предел текучести (150...350 МПа), что ограничивает область их использования только малонагруженными конструкциями.

Парамагнитные стали и сплавы применяют для изготовления немагнитных деталей конструкций в электротехнике, приборостроении, судостроении и специальных областях техники. Повышение износостойкости деталей, работающих в узлах трения, достигается азотированием (стали 40Г14Н9Ф2 и др.).

2.1.2.10. Старение углеродистой стали

Под *старением сталей* понимают изменение их свойств, протекающее во времени без заметного изменения микроструктуры. Старение сталей можно условно разделить на три вида: *термическое*, *деформационное* (механическое) и *термдеформационное*. Термдеформационное старение связано с возможностью одновременного протекания термического и деформационного старения.

Термическое старение происходит в результате изменения растворимости углерода и азота в α -железе при повышении температуры. Если в сталях при предшествующей термической обработке был зафиксирован пересыщенный α -твердый раствор (как, например, при сварке, охлаждении тонкого листа после прокатки и др.), то в процессе последующей выдержки при нормальной (*естественное старение*) или повышенной (50...100°C) (*искусственное старение*) температуре происходит распад твердого раствора с выделением третичного цементита в виде дисперсных частиц. Старение технического железа может быть связано также и с выделением из твердого раствора частичек нитридов Fe_{16}N_2 или Fe_4N .

Термическое старение заметно протекает в низкоуглеродистых сталях. При более высоком содержании углерода вследствие зародышевого воздействия большого количества цементитных частиц, образовавшихся при перлитном превращении, самостоятельного выделения третичного цементита не наблюдается.

Деформационное старение наступает после пластической деформации, если она происходит при температуре ниже температуры рекристаллизации, и особенно при 20°С. Деформационное старение развивается в течение 15—16 суток при 20°С и в течение нескольких минут при 200...350°С. Деформационное старение приводит к упрочнению стали, что связано в основном с ухудшением условий движения дислокаций и образованием карбидных и нитридных фаз во время нагрева.

Термическое и деформационное старение повышают прочность и твердость, но одновременно резко снижают ударную вязкость и повышают порог хладноломкости.

Старение отрицательно сказывается на эксплуатационных и технологических свойствах многих сталей. Оно может протекать в строительных и мостовых сталях, подвергаемых пластической деформации при гибке, монтаже, сварке, и, усиливаясь охрупчиванием при низких температурах, явиться причиной разрушения конструкции. Развитие деформационного старения резко ухудшает штампуемость листовой стали. Склонность сталей к старению снижается при модифицировании алюминием, титаном и ванадием.

2.1.3. Чугуны

2.1.3.1. Общие сведения

Чугун — сплав железа (основа) с углеродом (обычно 2...4%), содержащий постоянные примеси Si, Mn, S, P, а иногда и легирующие элементы Cr, Ni, V, Al и др. Как правило, хрупок.

Фазовая диаграмма состояния Fe — C (стабильная) представлена на рис. 56 (штриховые линии соответствуют выделению графита, а сплошные — цементита). Температуры плавления чугунов значительно ниже, чем у стали (на 300...400°С).

Углерод в чугуне может находиться в виде цементита, графита или одновременно того и другого. Образование стабильной фазы — графита в чугуне может происходить в результате непосредственного выделения его из жидкого (твердого) раствора или вследствие распада предварительно образовавшегося цементита (при замедленном охлаждении расплавленного чугуна цементит может подвергнуться разложению $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{Fe} + 3\text{C}$ с образованием феррита и графита). Процесс образования в чугуне (стали) графита называют *графитизацией*.

Графит повышает износостойкость и антифрикционные свойства чугуна вследствие собственного смазочного действия и повышения прочности пленки смазочного материала. Чугуны с графитом, как мягкой и хрупкой составляющей, хорошо обрабатываются резанием (с образованием ломкой стружки) и обеспечивают более чистую поверхность, чем стали (кроме автоматных).

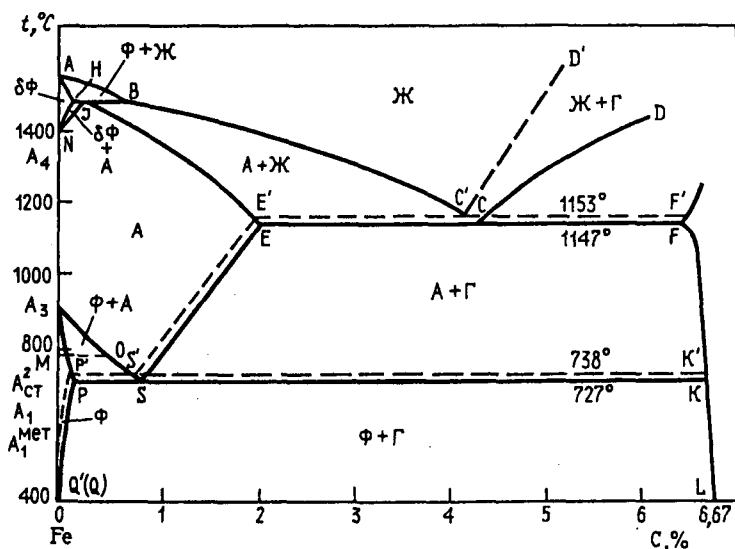


Рис. 56. Фазовая диаграмма стабильного равновесия Fe — C

Присутствие эвтектики в структуре чугунов обуславливает его использование исключительно в качестве литейного сплава. Высокие литейные свойства при небольшой стоимости обеспечили широкое применение чугунов в промышленности.

Механические свойства чугуна обусловлены главным образом количеством и структурными особенностями графитной составляющей. Влияние графитных включений на механические свойства чугуна можно оценить количественно (ГОСТ 3443—87). Чем меньше графитных включений, чем они мельче и больше степень их изолированности, тем выше прочность чугуна при одной и той же металлической основе. Наиболее высокую прочность обеспечивает шаровидная форма графитной составляющей, а для хлопьевидной составляющей характерны высокие пластические свойства. Чугун с пластинчатым графитом можно рассматривать как сталь, в которой графит играет роль надрезов, ослабляющих металлическую основу.

Применяемые для отливок чугуны в среднем имеют следующий состав: 2...4% C, 1,5...4% Si, 0,6...1,25% Mn, 0,1...1,2% P и менее 0,06% S.

Углерод определяет количество графита в чугуне: чем выше его содержание, тем больше образуется графита и тем ниже механические свойства. В то же время для обеспечения высоких литейных свойств (хорошей жидкотекучести) должно быть не меньше 2,4% C.

Кремний оказывает большое влияние на структуру и свойства чугунов, так как величина температурного интервала, в котором в равновесии с жидким сплавом находятся аустенит и графит, зависит от его содержания. Чем больше содержание кремния, тем шире эвтектический интервал темпе-

ратур. Таким образом, кремний способствует процессу графитизации, действуя в том же направлении, что и замедление скорости охлаждения. Изменяя, с одной стороны, содержание в чугунах углерода и кремния, а с другой — скорость охлаждения, можно получить различную структуру металлической основы чугуна.

Сера и марганец являются вредными технологическими примесями, содержание которых в чугунах ограничивают. Сера ухудшает механические и литейные свойства. И сера, и марганец препятствуют графитизации.

Фосфор не влияет на графитизацию, а при повышенном (до 0,4...0,5%) содержании увеличивает износостойкость чугунов, так как образуются твердые включения фосфидной эвтектики.

Самым распространенным видом термообработки чугунов является отжиг отливок при 430...600°C для уменьшения литейных напряжений, которые могут вызвать даже коробление фасонных изделий. Нормализация чугуна проводится для аустенизации ферритной и ферритно-перлитной матриц и последующего перлитного превращения, что обеспечивает упрочнение. Закалку чугуна на мартенсит с нагревом до 850...930°C и охлаждением в воде и масле применяют для повышения прочности и износостойкости. После закалки проводят низкий отпуск (200°C) для уменьшения закалочных напряжений или высокий отпуск (600...700°C) для получения микроструктур сорбита или зернистого перлита, обеспечивающих повышенную вязкость.

Классификацию чугунов проводят *по виду и форме углеродосодержащей структурной составляющей*, т.е. по наличию и форме графита.

По виду структурной составляющей выделяют чугуны без графита — *белые чугуны*, в которых практически весь углерод находится в химически связанном состоянии в виде цементита. Промежуточное положение занимает *половинчатый чугун*, большая часть углерода которого ($\approx 0,8\%$) находится в Fe_3C . Структура половинчатого чугуна — перлит, ледебурит и пластинчатый графит.

Чугуны с графитом в зависимости от формы последнего разделяют на *серые, ковкие и высокопрочные*. Серыми называют чугуны, в структуре которых графит имеет пластинчатую форму. В ковких чугунах графит имеет хлопьевидную форму, в высокопрочных чугунах — шаровидную. К числу высокопрочных относят также чугуны с графитом *вермикулярной* (греч. — червячок) *формы*, которые по свойствам (ГОСТ 28394—89) занимают промежуточное положение между чугунами с шаровидным и пластинчатым графитом.

2.1.3.2. Белые чугуны

Белые чугуны (передельные) в качестве конструкционных материалов используются редко, так как из-за большого содержания цементита очень хрупкие и твердые, с трудом отливаются и обрабатываются ин-

струментом. Из них делают детали гидромашин, пескометов и других конструкций, работающие в условиях повышенного абразивного изнашивания. Для увеличения износостойкости белые чугуны легируют хромом, ванадием, молибденом и иными карбидообразующими элементами. Маркировка белых чугунов не установлена.

Разновидностью белых чугунов являются *отбеленные чугуны*. Поверхностные слои изделий из таких чугунов имеют структуру белого (или половинчатого) чугуна, а сердцевина — серого чугуна. Отбел на некоторую глубину (12...30 мм) получают путем быстрого охлаждения поверхности (например, отливка чугуна в металлические или песчаные формы). Для снятия структурных напряжений, которые могут привести к образованию трещин, отливки подвергают нагреву при 500...550°C. Высокая износостойкость отбеленных чугунов обусловлена твердостью поверхности, достигающей 400...500 HV. Из отбеленного чугуна изготавливают прокатные валки листовых станков, колеса, шары для мельниц и др.

2.1.3.3. Серые чугуны

Структура серого (литейного) чугуна состоит из металлической основы с вкрапленным в нее графитом пластинчатой формы. Такая структура образуется непосредственно при кристаллизации чугуна в отливке в соответствии с диаграммой состояния системы Fe — C (стабильной). Причем чем больше углерода и кремния в сплаве и чем ниже скорость его охлаждения, тем выше вероятность кристаллизации по этой диаграмме с образованием графитной эвтектики. При низком содержании углерода и кремния чугун *модифицируют* небольшими дозами некоторых элементов (например, алюминия, кальция, церия).

Модифицирование металлов — введение в металлические расплавы модификаторов, т.е. веществ, небольшие количества которых (обычно не более десятых долей процента) способствуют созданию дополнительных искусственных центров кристаллизации и, следовательно, образованию структурных составляющих в измельченной или округлой форме, что улучшает механические свойства металла.

Для характеристики структуры серого чугуна необходимо определять размеры, форму, распределение графита, а также структуру металлической основы. В обычном сером чугуне при медленном охлаждении во время кристаллизации графит очень слабо разветвляется. Он похож на розетку с небольшим числом изогнутых лепестков.

Металлическая основа серых чугунов формируется из аустенита при эвтектоидном распаде и может быть перлитной, ферритной и ферритно-перлитной. Образование перлита происходит легко, в сравнительно короткий промежуток времени. Для получения ферритного белого чугуна используют изотермическую выдержку при 690...650°C, в результате

которой цементит перлита распадается на феррит и пластинчатый графит.

Механические свойства серых чугунов зависят от свойств металлической основы и главным образом от количества, формы и размеров графитных включений. Перлитная основа обеспечивает наибольшие значения показателей прочности и износостойкости.

Марки серых чугунов согласно ГОСТ 1412—85 состоят из букв СЧ и цифр, соответствующих минимальному пределу прочности при растяжении σ_B , МПа/10. Чугун СЧ10 — ферритный; СЧ15, СЧ18, СЧ20 — ферритно-перлитные чугуны; начиная с СЧ25 — перлитные чугуны.

На долю серого чугуна с пластинчатым графитом приходится около 80% общего производства чугунных отливок. Серые чугуны обладают высокими литейными качествами (жидкотекучесть, малая усадка, незначительный пригар металла к форме и др.), хорошо обрабатываются и сопротивляются износу, однако из-за низких прочности и пластических свойств в основном используются для изготовления неотчетственных деталей. В станкостроении серый чугун является основным конструкционным материалом (станины станков, столы и верхние салазки, колонки, каретки и др.); в автомобилестроении из ферритно-перлитных чугунов делают картеры, крышки, тормозные барабаны и др., а из перлитных чугунов — блоки цилиндров, гильзы, маховики и др. В строительстве серый чугун применяют в основном для изготовления деталей, работающих при сжатии (башмаков, колонн), а также санитарно-технических деталей (отопительных радиаторов, труб). Значительное количество чугуна расходуется для изготовления тюбингов, из которых сооружается туннель метрополитена. Из серого чугуна, содержащего фосфор (0,5%), изготавливают архитектурно-художественные изделия.

2.1.3.4. Ковкие чугуны

Ковкие чугуны с хлопьевидной формой графита получают из белых доэвтектических чугунов, подвергая их специальному *графитизирующему отжигу*. Графитизирующий отжиг белого чугуна основан на метастабильности цементита и состоит обычно из двух стадий (рис. 57).

Первая стадия (950...1050°C) подбирается по длительности такой, чтобы весь цементит, находящийся в структуре отливки, распался на аустенит и хлопьевидный графит. Процесс графитообразования облегчается при модифицировании (например, алюминием и бором). Чугун, полученный таким образом, называется *модифицированным*.

На второй стадии графитизирующего отжига при температуре эвтектоидного превращения формируется металлическая основа ковкого чугуна. В зависимости от режимов охлаждения ковкие чугуны могут иметь перлитную (непрерывное охлаждение), ферритную (очень медленное охлаждение в интервале 760...720°C или изотермическая выдержка при

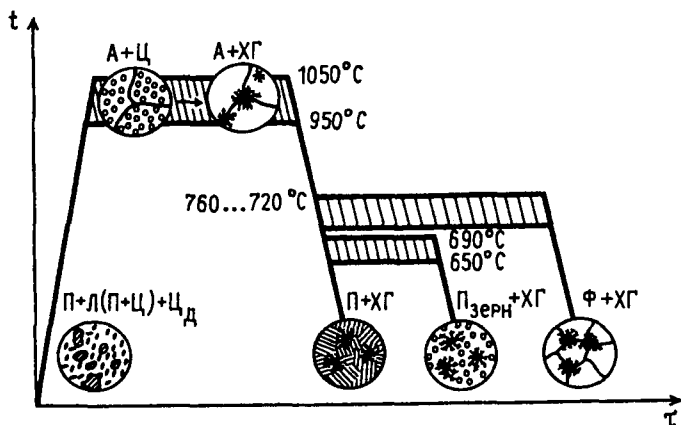


Рис. 57. Схема отжига белого чугуна на ковкий

720...700°C) или ферритно-перлитную (сокращение продолжительности второй стадии отжига) металлическую основу. Для получения в модифицированном ковком чугуне перлитной основы рекомендуется увеличивать содержание марганца, хрома и некоторых других элементов, которые повышают устойчивость цементита к распаду на феррит и пластинчатый графит в области температур эвтектоидного превращения.

Ковкие чугуны с перлитной металлической основой обладают высокими твердостью (235...305 НВ) и прочностью ($\sigma_B = 650...800$ МПа) в сочетании с небольшой пластичностью ($\delta = 3,0...1,5\%$). Ковкий ферритный чугун характеризуется высокой пластичностью ($\delta = 10...12\%$) и относительно низкой прочностью ($\sigma_B = 370...300$ МПа).

Существенными недостатками графитизирующего отжига чугунов являются длительность отжига отливок (24—60 ч) и ограничение толщины их стенок.

Ковкие чугуны согласно ГОСТ 1215—79 маркируются буквами КЧ — (ковкий чугун) и двумя группами цифр. Первые две цифры в обозначении марки соответствуют минимальному пределу прочности при растяжении σ_B , МПа/10, цифры после тире — относительному удлинению при растяжении, %. Чугуны марок КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ35-10, КЧ37-12, имеющие повышенное значение удлинения при растяжении, относятся к ферритным, а марок КЧ45-7, КЧ50-5, КЧ55-4, КЧ60-3, КЧ65-3, КЧ70-2, КЧ80-1,5 — к перлитным чугунам.

Ковкие чугуны, обладая высокими пластическими свойствами, находят применение при изготовлении разнообразных тонкостенных (до 50 мм) деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках (фланцы, муфты, картеры, ступицы и др.). Масса этих деталей составляет от нескольких граммов до нескольких тонн.

Для повышения твердости, износостойкости и прочности изделий из ковкого чугуна иногда применяют нормализацию или закалку. Закалка с последующим высоким отпуском позволяет получить структуру зернистого перлита.

2.1.3.5. Высокопрочные чугуны

Высокопрочный чугун (ЧШГ — чугун с шаровидным графитом) получают модифицированием жидкими присадками (0,1...0,5% магния от массы обрабатываемой порции чугуна и 0,2...0,3% церия, иттрия и некоторых других элементов). При этом перед вводом модификаторов необходимо снизить содержание серы до 0,02...0,03%.

Рекомендуемый химический состав высокопрочного чугуна (2,7...3,7% С; 0,5...3,8% Si) выбирается в зависимости от толщины стенок отливки — чем тоньше стенка, тем больше углерода и кремния. Чтобы избежать образования в высокопрочных чугунах ледебурита, их подвергают графитизирующему отжигу. Продолжительность такого отжига благодаря повышенному содержанию графитизирующих элементов (углерода, кремния) значительно короче, чем при отжиге белого чугуна.

Структура высокопрочного чугуна состоит из металлической основы (феррита, перлита) и включений графита шаровидной формы. Шаровидный графит, имеющий минимальную поверхность при данном объеме, значительно меньше ослабляет металлическую основу, чем пластинчатый графит, и не является активным концентратором напряжений.

Ферритные чугуны имеют $\sigma_{0,2} = 220...310$ МПа, $\delta = 22...10\%$, 140...225 НВ; перлитные — $\sigma_{0,2} = 370...700$ МПа, $\delta = 7...2\%$ и 153...360 НВ.

Марки высокопрочных чугунов согласно ГОСТ 7293—85 состоят из букв ВЧ и цифр, соответствующих минимальному пределу прочности при растяжении, σ_B , МПа/10: ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45 — ферритные чугуны; ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100 — перлитные чугуны.

Высокопрочные чугуны обладают хорошими литейными и потребительскими свойствами (обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации, высокая износостойкость и др.). Они используются для массивных отливок взамен стальных литых и кованных деталей — цилиндров, шестеренок, коленчатых и распределительных валов и др.

Для повышения механических свойств (пластичности и вязкости) и снятия внутренних напряжений отливки подвергают термической обработке (отжигу, нормализации, закалке и отпуску). Рекомендуется подвергать чугунные изделия объемной закалке. Образование мелкоиглочатого мартенсита в закаленном поверхностном слое изделий повышает их износостойкость в 3 раза и более. Для повышения износостойкости применяется также азотирование (или азотирование с последующей «обдувкой дробью»), при котором в поверхностных слоях изделий создаются благоприятные сжимающие напряжения.

2.1.3.6. Чугуны специального назначения

К этой группе чугунов относятся *жаростойкие* (ГОСТ 7769—82), *жаропрочные* и *коррозионностойкие* (ГОСТ 11849—76) чугуны. Сюда же можно отнести *немагнитные*, *износостойкие* и *антифрикционные* чугуны.

Жаростойкими являются серые и высокопрочные чугуны, легированные кремнием (ЧС5) и хромом (ЧХ28, ЧХ32). Эти чугуны обладают жаростойкостью до 700...800°С на воздухе, в топочных и генераторных газах. Высокой термо- и жаростойкостью обладают аустенитные чугуны: высоколегированный никелевый серый ЧН15Д7 и с шаровидным графитом ЧН15Д3Ш.

К жаропрочным чугунам относятся аустенитные чугуны с шаровидным графитом ЧН19Х3Ш и ЧН11Г7Ш. Для повышения жаропрочности чугуны подвергают отжигу с последующим отпуском. После отжига легированные карбиды приобретают форму мелких округлых включений.

В качестве коррозионностойких применяют чугуны, легированные кремнием (*ферросилиды*) — ЧС13, ЧС15, ЧС17 и хромом — ЧХ22, ЧХ28, ЧХ32. Они обладают высокой коррозионной стойкостью в серной, азотной и ряде органических кислот. Для повышения коррозионной стойкости кремнистых чугунов их легируют молибденом (ЧС15М4, ЧС17М3 — *антихлоры*). Введение в чугун 0,2...0,5% Мо уменьшает склонность к росту зерна, повышает вязкость, сопротивление износу и улучшает свойства при повышенных температурах. Высокой коррозионной стойкостью в щелочах обладают никелевые чугуны, например аустенитный чугун ЧН15Д7.

В качестве немагнитных чугунов также применяются аустенитные чугуны. Их используют в тех случаях, когда требуется минимальная потеря мощности (крышки масляных выключателей, концевые коробки трансформаторов и др.) или когда нужно избегать искажений магнитного поля (стойки для магнитов).

К износостойким чугунам относятся половинчатые и отбеленные чугуны. К износостойким половинчатым чугунам относится, например, серый чугун марки ИЧНХ2, легированный никелем и хромом, а также ИЧХНТ, ИЧН1МШ (с шаровидным графитом). Из этих чугунов отливают детали двигателей внутреннего сгорания (крышки и днища цилиндров, головки поршней и др.).

Антифрикционными чугунами являются серые и высокопрочные чугуны специальных марок. Некоторое применение нашли также ковкие антифрикционные ферритно-перлитные чугуны АЧК-1 и АЧК-2.

Антифрикционные серые чугуны (перлитные АЧС-1 и АЧС-2 и перлитно-ферритный АЧС-3) обладают низким коэффициентом трения, зависящим от соотношения феррита и перлита в основе, а также от количества и формы

графита. В перлитных чугунах высокая износостойкость обеспечивается металлической основой, состоящей из тонкого перлита и равномерно распределенной фосфорной эвтектики при наличии изолированных выделений пластинчатого графита.

Антифрикционные серые чугуны применяют для изготовления подшипников скольжения, втулок и других деталей, работающих при трении о металл, чаще в присутствии смазочного материала. Детали, работающие в паре с закаленными или нормализованными стальными валами, изготавливают из чугунов АЧС-1 и АЧС-2, а в паре с термически не обработанными валами — чугуна АЧС-3.

Антифрикционные высокопрочные (с шаровидным графитом) чугуны (ГОСТ 1585—85) изготавливают с перлитной (АЧВ-1) и ферритно-перлитной ($\approx 50\%$ перлита) (АЧВ-2) структурой. Детали из АЧВ-1 используются для работы в узлах трения с повышенными окружными скоростями в паре с закаленным или нормализованным валом. АЧВ-2 применяют для пары с валом в состоянии поставки («сырым»).

Главное достоинство антифрикционных чугунов по сравнению с баббитами и антифрикционными бронзами — низкая стоимость, а основной недостаток — плохая прирабатываемость, что требует точного сопряжения трущихся поверхностей.

2.2. Титан и сплавы на его основе

Титан (Ti) — химический элемент VI группы периодической системы элементов, атомный номер 22, атомная масса 47,9. Серебристо-белый металл, легкий, тугоплавкий, прочный, пластичный; плотность — 4500 кг/м^3 ; $t_{\text{пл}}$ — 1665°C . Имеются две аллотропические модификации:

- низкотемпературная до 882°C — α -титан с гексагональной решеткой, плотность — 4505 кг/м^3 ;
- высокотемпературная — β -титан с объемно-центрированной кубической решеткой, плотность при 900°C — 4320 кг/м^3 .

Постоянные примеси (азот, углерод, кислород и водород) увеличивают твердость и прочность титана, но понижают пластичность, ухудшают свариваемость и снижают сопротивление коррозии. Особенно вреден водород, охрупчивающий титан из-за выделения гидридов. Содержание водорода в сплавах не должно превышать $0,015\%$.

Марки технического титана: ВТ1-00 (99,53% Ti), ВТ1-0 (99,45% Ti). Основные механические свойства технического титана: $\sigma_{\text{в}} = 300 \dots 550 \text{ МПа}$; $\delta = 20 \dots 25$ и $60 \dots 80\%$; $KCU < 1,0 \dots 1,2 \text{ МДж/м}^2$; $E = 14 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; твердость 100 НВ.

Титан благодаря защитной пленке из TiO_2 обладает очень высокими коррозионной и химической стойкостью, сохраняющимися в интервале

температур от -250 до $+550^{\circ}\text{C}$ и значительно превосходящими эти показатели у нержавеющей стали, и других сплавов.

Технический титан используется для изготовления химических и пищевых емкостей, а как конструкционный материал — в криогенной технике, в восстановительной хирургии и т.д. Его поставляют в виде листов, труб, проволоки и других полуфабрикатов. Технический титан хорошо обрабатывается давлением, сваривается дуговой сваркой в атмосфере защитных газов и контактной сваркой, но плохо обрабатывается резанием. Карбид титана, обладающий высокой твердостью, входит в состав твердых сплавов, применяемых для изготовления режущих инструментов. Губчатый титан широко используется в вакуумной технике. Оксид титана применяется в лакокрасочном производстве. Ограничивает повсеместное использование титана его очень высокая стоимость.

Титановые сплавы. Подавляющее большинство металлов образуют с титаном диаграммы состояния с эвтектидным превращением. По структуре титановые сплавы делят на α -, ($\alpha + \beta$)- и β -сплавы. Все легирующие элементы по влиянию на полиморфизм титана можно разделить на три группы (С.Г. Глазунов, Б.А. Колачев):

1. Первая группа представлена *α -стабилизаторами* — элементами, повышающими температуру полиморфного превращения титана (рис. 58, а). Из металлов к числу α -стабилизаторов относятся алюминий, галлий и индий, из неметаллов — углерод, азот и кислород.

2. Ко второй группе принадлежат *β -стабилизаторы* — элементы, понижающие температуру полиморфного превращения титана. β -стабилизаторы, в свою очередь, можно разбить на три подгруппы:

а) *эвтектоидообразующие стабилизаторы* (рис. 58, б), обеспечивающие эвтектидный распад β -фазы при достаточно низкой температуре (хром, марганец, железо, медь, никель, кобальт);

б) *изоморфные стабилизаторы* (рис. 58, в), образующие непрерывные растворы с β -титаном (ванадий, молибден, ниобий, тантал). К этой же подгруппе следует отнести и вольфрам, в системе (рис. 58, г) с титаном образующий непрерывные растворы $\beta\text{-Ti}$ и W, при этом α -фаза при всех температурах находится в равновесии с β -фазой;

в) *изоморфные квази- β -стабилизаторы*, стабилизирующие β -фазу, но без образования β -твердых растворов (рений, рутений, родий, осмий, иридий).

3. Элементы третьей группы мало влияют на полиморфное превращение. Эти элементы называют *нейтральными упрочнителями* (олово, цирконий, германий, гафний и торий).

Наилучшее сочетание свойств достигается в ($\alpha + \beta$)-сплавах. Сплавы с двухфазной микроструктурой ($\alpha + \beta$) в равновесном состоянии подверга-

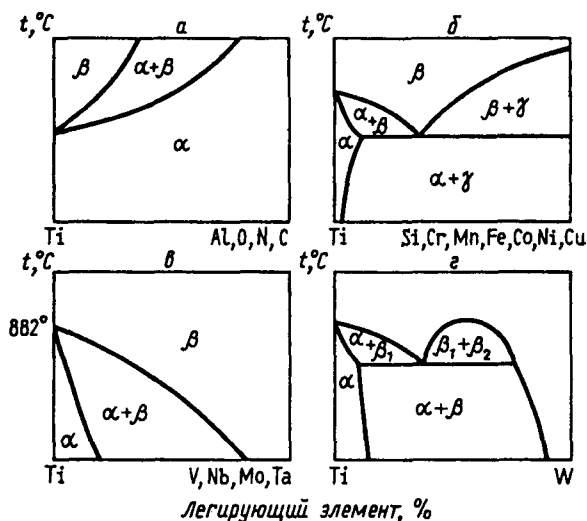


Рис. 58. Схема влияния легирующих элементов и примесей на температуру полиморфного превращения титана (С.Г. Глазунов, Б.А. Колачев)

ются упрочняющей термической обработке — закалке и старению. После закалки они имеют структуру, состоящую из двух метастабильных фаз — мартенситной игольчатого вида (α') и β -фазы, а при введении модификаторов-стабилизаторов β -фазы — только из одной метастабильной β -фазы. Процессы старения улучшают прочностные свойства, но снижают пластичность и вязкость.

Основным легирующим элементом в промышленных титановых сплавах является алюминий. Два следующих по значимости легирующих элемента — ванадий и молибден. Еще в качестве легирующих элементов используются по крайней мере семь металлов: Cr, Mn, Fe, Cu, Sn, Zr, W. Для микролегирования используют Nb, Ta, Pd и др. Легирующие элементы оказывают различное влияние на свойства сплавов: Al, Zr, Nb повышают жаропрочность до 550°C; Mo, Zr, Nb, Ta, Pd повышают коррозионную стойкость в кислотах.

Из неметаллов для легирования титановых сплавов наибольшее значение имеют кремний, вводимый для повышения жаропрочности, и бор, оказывающий модифицирующее действие, а также элементы, образующие твердые растворы внедрения, — C_2 , O_2 , N_2 , H_2 , снижающие пластичность, но повышающие прочность, а углерод, помимо того, увеличивает твердость и износостойкость. Так как последние из перечисленных элементов относятся к вредным примесям, их содержание в сплавах должно быть минимальным.

Титановые сплавы (ГОСТ 19807—91) относятся к группе легких сплавов (4500 кг/м³) и характеризуются высокой удельной прочностью.

Так, при одинаковой прочности (например, $\sigma_B = 450$ МПа) изделия из титановых сплавов в 1,8 раза легче стальных. У этих сплавов хорошие жаропрочные свойства и отсутствует хладноломкость, в том числе при очень низких температурах. Титановые сплавы практически превосходят нержавеющие стали, медные и никелевые сплавы в стойкости против коррозии в морской воде, а также в таких агрессивных средах, как влажный хлор, горячая азотная кислота высокой концентрации и др. Титановые сплавы немагнитны, обладают низкой теплопроводностью и малым коэффициентом линейного расширения. Вместе с тем они уступают сталям, особенно с повышенным содержанием углерода, в твердости и износостойкости. Титановые сплавы удовлетворительно обрабатываются резанием, могут свариваться.

Эти сплавы классифицируются *по способу производства, структуре, механическим свойствам и способности упрочняться термической обработкой.*

По способу производства титановые сплавы делят на *деформируемые и литейные сплавы.* Наиболее распространены литейные сплавы ВТ1Л, ВТ5Л6 ВТ9Л. Сплав ВТ1Л обладает наибольшей химической стойкостью, его применяют для изготовления деталей, работающих в агрессивных средах. Механические свойства низкие. Сплав ВТ5Л применяют для деталей, работающих при температурах от -235 до $+350^\circ\text{C}$. Сплав ВТ9Л наиболее высокопрочный и предназначен для изготовления нагруженных деталей, работающих при температурах до 500°C .

По механическим свойствам титановые сплавы делят на *сплавы нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные и повышенной пластичности.*

По способности упрочняться термической обработкой различают *упрочняемые и неупрочняемые титановые сплавы.*

Промышленные титановые сплавы — важнейшие конструкционные материалы. Сплавы ВТ-5, ВТ5-1, ОТ4 (α -сплавы), ВТ6, ВТ14, ВТ8 ($\alpha+\beta$ -сплавы) применяются:

- в химической промышленности (теплообменники, компрессоры, насосы и др.);
- в машиностроении (клапаны, золотники, пружины, коленчатые валы и др.);
- в производстве конструкционных элементов (диски, лопатки компрессоров, обшивка ракет и др.).

Несмотря на высокую стоимость производства и обработки изделий из титановых сплавов, применение их оказывается выгодным благодаря их коррозионной стойкости, долговечности и экономии массы. Однако из-за дефицитности титана использование титановых сплавов весьма ограничено. В настоящее время применяют вторичные титановые сплавы (ВТВ1, ВТВ2, ВТВ3, ВТВ4), основу шихты которых составляют отходы технологического производства, а также слитки из этих отходов.

2.3. Тугоплавкие металлы и сплавы на их основе

К *тугоплавким* относят *металлы*, температура плавления которых превышает 1800°C. Наибольшее значение в технике имеют следующие тугоплавкие металлы: Nb, Mo, Cr, W.

Тугоплавкие металлы имеют прочные межатомные связи, что и обеспечивает им высокую температуру плавления. Они отличаются малым тепловым расширением, небольшой теплопроводностью, повышенной жесткостью. Механические свойства таких металлов зависят от способа производства и содержания примесей, которые увеличивают их хрупкость. Молибден, хром и вольфрам особенно склонны к хрупкому разрушению из-за высокой температуры порога хладноломкости, которую особенно сильно повышают примеси внедрения C, N, H и O. Наклеп понижает температуру перехода в хрупкое состояние. Жаропрочность тугоплавких металлов может быть повышена как легированием, так и азотированием при 1100...1200°C в азоте.

Большой недостаток тугоплавких металлов — низкая жаростойкость, поэтому при температурах свыше 400...600°C их нужно защищать от окисления. Тугоплавкие металлы трудно обрабатываются, так как имеют большое сопротивление пластическому деформированию.

Сплавы на основе тугоплавких металлов обладают более высокой жаропрочностью, чем сами чистые металлы (1500...2000°C). Тугоплавкие металлы легируют в двух целях: а) для уменьшения их склонности к хрупкому разрушению; б) для повышения прочностных и жаропрочных характеристик. Сплавы на основе тугоплавких металлов подразделяют на две группы:

- 1) сплавы со структурой твердого раствора;
- 2) сплавы, упрочняемые закалкой и старением.

В сплавах первой группы содержание легирующих элементов (Ti, Nb, Zr, Mo, W, Ta, Re) выбирают таким, чтобы при увеличении прочности не снизить пластичность и не ухудшить другие свойства. Сплавы второй группы содержат повышенное количество углерода и карбидообразующие элементы. При старении этой группы сплавов упрочняющей фазой являются карбиды, которые выделяются внутри зерен.

Ниобий (Nb) — химический элемент V группы периодической системы элементов, атомный номер 41, атомная масса 92,9064. Тугоплавкий светло-серый металл, плотность 8570 кг/м³, $t_{пл} = 2500^\circ\text{C}$, температура перехода в сверхпроводящее состояние 9,25 К.

Ниобий — высокопластичный металл с очень низким (ниже -196°C) порогом хладноломкости. Химически очень стоек. Хорошо сваривается. Для повышения жаропрочности ниобий легируют молибденом, воль-

франом и цирконием. Широкое использование получил как компонент химически стойких и жаростойких сталей, из которых изготовляют детали ракет, реактивных двигателей, химическую и нефтеперегонную аппаратуру. Недостатки ниобия и его сплавов — малый модуль Юнга и большая склонность к окислению при повышенных температурах. Основными легирующими элементами для сплавов на основе ниобия являются W, Mo, Ti, Ta, V, Zr, Hf и элементы внедрения (C, O, N).

Сплавы на основе ниобия (ВН-2А, ВН-4) обладают хорошей технологичностью, свариваемостью и достаточно высокой жаропрочностью — до 1300°C (300...850 МПа). Ниобием и его сплавами покрывают тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. Станид Nb₃Sn, германид Nb₃Ge, сплавы ниобия с Sn, Ti и Zr используют в радиоэлектронике для изготовления сверхпроводящих соленоидов (Nb₃Ge — сверхпроводник с наиболее высокой температурой перехода в сверхпроводящее состояние).

Как чистый ниобий, так и его сплавы активно взаимодействуют при нагреве с атмосферными газами, что требует применения защитных покрытий.

Молибден (Mo) — химический элемент VI группы периодической системы элементов, атомный номер 42, атомная масса 95,94. Светло-серый металл, плотность 10200 кг/м³, $t_{пл} = 2620^{\circ}\text{C}$. Химически стоек (на воздухе окисляется при температуре выше 400°C). Соединения молибдена обладают значительной окислительно-восстановительной и каталитической способностью. В природе существуют семь изотопов молибдена; искусственно получены еще 10. Молибден относится к стратегическим металлам.

Для изготовления из молибдена и сплавов на его основе изделий различных профилей можно применять почти все известные способы обработки: выдавливание, ковку, прокатку, штамповку, вытяжку и механическую обработку резанием. При этом для обеспечения необходимой прочности конечные стадии обработки надо проводить при температурах ниже температуры рекристаллизации.

Более 75% молибдена применяют для легирования сталей, используемых в авиа- и автомобилестроении, при изготовлении лопаток турбин и др. Весьма перспективны жаропрочные (для реактивных двигателей) и кислотоупорные (аппараты химической промышленности) сплавы; так, сплав Fe — Ni — Mo стоек по отношению ко всем кислотам (кроме Hf) до 100°C. Молибден — важнейший конструкционный материал в производстве нитей для электрических ламп и катодов для электровакуумных приборов. Его используют в гальванопластике (*молибденирование*), а также в аналитической химии для определения фосфора, мышьяка, кремния, германия и некоторых других элементов.

Молибденирование — нанесение тонкого слоя молибдена на поверхность металлических изделий (главным образом из стали, титана, ниобия) для повышения твердости, поверхностной прочности, коррозионной стойкости в азотной кислоте, а с дополнительным силицированием — жаростойкости.

Природный минерал молибденит MoS_2 является лучшей смазкой для трущихся металлических частей при высоких температурах, повышенном или пониженном давлении, в обычной атмосфере и при отсутствии кислорода.

Сплавы молибдена легированы Zr, Ti, Hf, Nb, W, которые образуют с последним твердые растворы и упрочняют его. Для увеличения пластичности в сплав добавляют Re. Низколегированные сплавы молибдена — это ВМ1, ЦМ2А, ВМ2 (системы $\text{Mo} - \text{Ti} - \text{Zr}$). Большой жаропрочностью обладают гетерофазные, термически упрочняемые сложнолегированные сплавы — ВМ3, ЦМВ30, ЦМВ50, ЦМ10. Длительную прочность молибденовых сплавов повышает вольфрам, вводимый в большом количестве (30 и 50%), — сплавы ЦМВ30 и ЦМВ50. Сплав ЦМ10 относится к свариваемым сплавам из-за уменьшения в нем содержания углерода и примесей внедрения.

Хром (Cr) — химический элемент VI группы периодической системы элементов, атомный номер 24, атомная масса 51,996. Твердый металл серо-стального цвета; плотность 7190 кг/м^3 , $t_{\text{пл}} = 1903^\circ\text{C}$. На воздухе не окисляется. Хром — обязательный компонент нержавеющих, кислотоупорных, жаростойких сталей и большого числа сплавов (нихромы, хромали, стеллит). Применяется для хромирования.

Сплавы хрома, как и чистый хром, обладают очень высокой стойкостью к окислению, вплоть до $1000...1100^\circ\text{C}$. Хром в этих сплавах легируется W, V, Ni, Ti, Y (сплавы ВХ-1И, ВХ-2, ВХ-4), а также Hf, Mo, Zr, Ta. Сплавы хрома, кроме высоколегированного сплава ВХ-4, малопластичные, но обеспечивают высокие значения длительной прочности.

Вольфрам (W) — химический элемент VI группы периодической системы элементов, атомный номер 74, атомная масса 183,85. Светло-серый, очень тяжелый (плотность 19300 кг/м^3) металл, наиболее тугоплавкий ($t_{\text{пл}} = 3410^\circ\text{C}$) из металлов. Важные свойства вольфрама: высокая электронная эмиссия при накаливании металла (например, $298 \cdot 10^4 \text{ мА/м}^2$ при 2230°C) и большая мощность излучаемой поверхностью металла энергии при высоких температурах. На воздухе при обычной температуре он устойчив к коррозии. К недостаткам вольфрама следует отнести высокую склонность к хладноломкости и малое сопротивление окислению даже при не слишком высоких температурах.

В промышленном масштабе применяют в основном нелегированный вольфрам, а число промышленных и полупромышленных сплавов на его основе весьма ограничено.

Главная область применения вольфрама — производство сталей (около 85%). Он входит в состав жаропрочных сверхтвердых сталей (инструментальные, быстрорежущие) и сплавов (победит, стеллит и др.). Чистый вольфрам используется в электротехнике (нити ламп накаливания) и радиоэлектронике (катоды и аноды электронных приборов), для спиральных нагревателей в электрических печах, электродов, различных деталей для высоковакуумных и рентгеновских приборов, при атомно-водородной сварке.

Сплавы на основе вольфрама могут быть легированы Nb, Ta, Mo, Zr, Hf, Re, C и др. Различают однофазные сплавы вольфрама — твердые растворы — и гетерофазные, упрочненные дисперсионными частицами карбидов, боридов и оксидов. К однофазным сплавам относятся сплавы систем W — Nb и W — Mo, к группе гетерофазных — системы W — Ta — C (сплав TCB).

2.4. Цветные металлы и сплавы на их основе

Маркировка цветных сплавов отличается от принятой маркировки для черных металлов и сплавов, в том числе буквенным обозначением химических элементов (см. табл. б).

2.4.1. Медь и сплавы на ее основе

2.4.1.1. Медь

Медь (Cu) — химический элемент I группы периодической системы элементов, атомный номер 29, атомная масса 63,546. Медь обладает гранецентрированной кубической решеткой. Это металл красного (в изломе розового) цвета, ковкий и мягкий; плотность 8960 кг/м^3 , $t_{\text{пл}} = 1083^\circ\text{C}$. Химически она малоактивна; в атмосфере, содержащей CO_2 , пары H_2O и др., покрывается *патиной*.

Патина — пленка основного карбоната различных оттенков (в основном зеленоватых), образующаяся на поверхности изделий из меди, бронзы, латуни при окислении металла под воздействием естественной среды или специальной обработки (патинирования). Патина предохраняет изделия от коррозии, имеет и декоративное значение. Ядовита.

Среди свойств меди наиболее существенное значение для современной промышленности приобрело ее высокое электрическое сопротивление — $0,0175 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. Эта величина принята в электротехнике за *эталонное значение* — 100%. В технике большое значение имеет также высокая удельная теплопроводность меди — $394 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Температурный коэффициент линейного расширения меди $1,67 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$.

Все примеси, особенно входящие в твердый раствор, снижают электропроводность, а также теплопроводность меди. Наиболее сильно

уменьшают электропроводность примеси Р, As, Al и Sn (см. рис. 36). Механические свойства меди сравнительно невелики и существенно зависят от условий изготовления медных изделий. Так, в литом состоянии — $\sigma_{\text{в}} = 160$ МПа, $\sigma_{0,2} = 35$ МПа, $\delta = 25\%$; после горячекатанной обработки $\sigma_{\text{в}} = 240$ МПа, $\sigma_{0,2} = 95$ МПа, $\delta = 45\%$.

Холодное пластическое деформирование повышает предел прочности до 450 МПа при снижении относительного удлинения до 3%. Модуль упругости меди — 115 000 МПа. Твердость меди почти в 2 раза меньше, чем у железа.

Среди технологических свойств у меди следует отметить хорошие обрабатываемость давлением и возможность пайки. К недостаткам меди относятся усадка при литье, невысокая обрабатываемость резанием и очень плохая свариваемость. В технической меди могут присутствовать вредные примеси, образующие с медью: твердые растворы — Ni, Zn, Sb и др.; легкоплавкие эвтектики — Pb, Bi и др.; хрупкие химические соединения — кислород, сера.

Наиболее опасными из них по влиянию на технологические свойства являются свинец, вызывающий краснотомкость, и висмут, вызывающий и красно- и хладнотомкость. Эти виды хрупкости объясняются тем, что примеси свинца и висмута располагаются по границам зерен.

По чистоте изготавливают следующие марки меди (ГОСТ 859—2001): М00к (не менее 99,99% Cu), М0к (99,97% Cu), М1к (99,95% Cu), М2к (99,93% Cu). В обозначении марки после буквы М (медь) указывается условный номер чистоты, а затем буквой способ и условия получения меди: к — катодная медь; б — бескислородная медь; р — раскисленная медь; ф — медь, раскисленная фосфором. В обозначение меди марок М1 и М1р, предназначенной для электротехнической промышленности и подлежащей испытаниям на электропроводность, дополнительно включают букву Е.

Главное применение меди — производство электрических проводов. Примеси понижают ее электропроводность, поэтому в электротехнике используются сорта с суммарным содержанием примесей менее 0,1%, такие, как М00, М0, М1. Медь является основным материалом для производства телеграфных и телефонных проводов. Она применяется для изготовления конструкционных изделий в теплотехнике (нагревателей, радиаторов, теплообменников, холодильников и др.) и вакуумной технике. Медь применяют в виде листов, прутков, труб и проволоки.

Более 30% меди идет на производство сплавов. Преимуществами медных сплавов являются хорошая электропроводность, низкий коэффициент трения, высокая пластичность, большая прочность (300...1200 МПа), коррозионная стойкость в ряде агрессивных сред, возможность термомеханической обработки.

Наиболее распространенные легирующие элементы в меди: цинк, алюминий, олово, железо, кремний, марганец, бериллий, никель. Они повышают прочностные свойства меди; наиболее сильное упрочняющее действие оказывают кремний и алюминий (при содержании более 3% по массе). Цинк и марганец мало влияют на пластичность меди. Пластичность повышается при легировании до определенных концентраций алюминием, кремнием, железом. Олово занимает промежуточное положение между этими двумя группами легирующих элементов.

По способу изготовления деталей медные сплавы подразделяются на *деформируемые* и *литейные сплавы*. Из деформируемых медных сплавов изготавливают листы, ленты, трубы, полуфабрикаты различного профиля. Из литейных сплавов методом литья в формы получают фасонные детали и художественные изделия.

Упрочнение медных сплавов путем термической обработки возможно только в том случае, если легирующие элементы растворяются в меди ограниченно, при этом растворимость их уменьшается с понижением температуры, а кроме того, если эти легирующие элементы образуют с медью или между собой упрочняющие фазы (CuBe , CuAl_2 , NiBe , Ni_3Al и др.). Твердость и прочность медных сплавов могут быть повышены в 1,5—3 раза за счет наклепа, который при необходимости может быть снят частично или полностью отжигом ($600\ldots 700^\circ\text{C}$).

Медные сплавы подразделяются на *латуни*, *бронзы* и *медно-никелевые сплавы*.

2.4.1.2. Латуни

Латунями (ГОСТ 15527—70 и ГОСТ 17711—93) называют двойные и многокомпонентные (добавки Al, Sn, Fe, Mn, Ni, Si, Pb и других элементов в сумме до 10%) сплавы на основе меди, в которых главной добавкой является цинк, причем его содержание может меняться до 49%. Медь с цинком образует твердый раствор с предельной концентрацией цинка 39%.

По химическому составу латуни подразделяются на *двойные (простые)* и *многокомпонентные (специальные)*, а по структуре — на *одно-* и *многофазные*. Простые латуни легируются только одним компонентом — цинком.

Содержание в латунях цинка во многом определяет величину их механических свойств (рис. 59). Пока латунь имеет структуру α -твердого раствора, увеличение содержания цинка вызывает повышение ее прочности и пластичности. Появление ($\approx 30\%$ Zn) β' -фазы сопровождается резким снижением пластичности, но прочность продолжает повышаться до увеличения содержания Zn до 45%, пока латунь находится в двухфазном состоянии ($\alpha + \beta'$). Переход латуни в однофазное состояние (более 45% Zn) со структурой β' -фазы вызывает резкое снижение прочности.

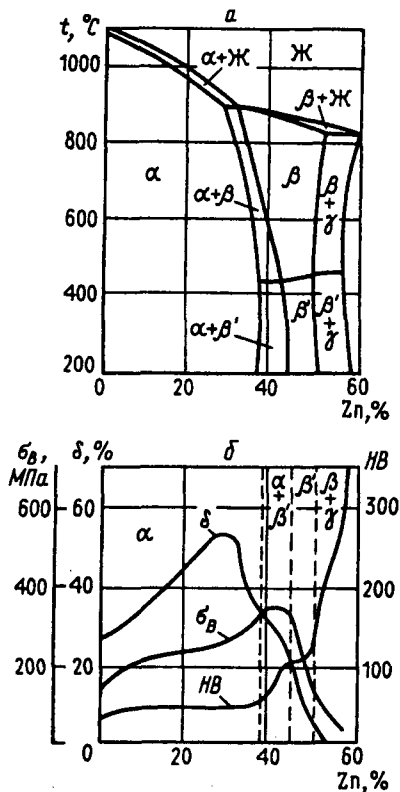


Рис. 59. Влияние содержания цинка на фазовый состав (а) и механические свойства (б) латуней

Простые латуни маркируются буквой Л, следующая за ней цифра означает содержание меди. Легирующие элементы обозначаются буквами (см. табл. 6). В марке многокомпонентной латуни после букв следуют цифры через дефис. Первая цифра указывает среднее содержание меди, остальные — содержание соответствующих легирующих элементов в том же порядке, как и буквы, их обозначающие. Содержание цинка в наименовании марки латуни не указывается и определяется по разности. Например, в латуни ЛА85-1,5 — 85% Cu и 1,5% Al, остальное — цинк.

Многокомпонентные латуни (ЛАЗ60-1-1, ЛЖМц59-1-1, ЛО62-1, Л070-1, ЛС59-1, ЛЦ40С, ЛЦ40Мц3Ж, ЛЦ30А3 и др.) могут легироваться различными элементами и их комплексами. Так, алюминий, кремний, никель и марганец повышают механические свойства латуней и увеличивают их коррозионную стойкость. Олово повы-

шает коррозионную стойкость латуни в морской воде. Свинец (1...3%) улучшает обрабатываемость латуней резанием (латуни со свинцом являются автоматными сплавами, их используют для изготовления деталей в часовой и автотракторной промышленности).

К однофазным (α -латуни) относятся латуни, содержащие менее 32% Zn. Эти латуни весьма пластичны, хорошо паяются, свариваются и обрабатываются давлением в горячем и холодном состояниях. Латуни, содержащие до 10% Zn, называют *томпаком* (Л96, Л90), от 10 до 20% Zn — *полутомпаком*, от 20 до 30% Zn — *патронными* (Л80, Л85, Л70). С увеличением содержания цинка цвет латуней изменяется от красноватого до светло-желтого, повышаются предел прочности от 270 до 320 МПа и твердость от 470 до 500 НВ. Прочность однофазной латуни может быть значительно повышена холодной пластической деформацией.

Томпак имеет очень хорошую пластичность и высокую коррозионную стойкость. Он применяется для изготовления радиаторных трубок, деталей конденсационно-холодильного оборудования, уплотнительных прокладок, биметалла сталь-латунь, в ювелирном деле и т.д. Патронные латуни используют для производства деталей электрооборудования, проволоки, гильз и пр.

В двухфазных ($\alpha + \beta$) латунях увеличение содержания цинка свыше 40% приводит к росту предела прочности до 360 МПа и повышению доли хрупкой фазы в их структуре (в β -фазе при 450°C происходит упорядочение и образуется β' -фаза), и как следствие это ведет к ограничению применения таких латуней в машиностроении. Двухфазные латуни марок Л68, ..., Л59 хорошо обрабатываются давлением в горячем состоянии, ковкой. Изделия из таких латуней (проволока, трубы, прутки, листы, ленты) изготавливаются холодной штамповкой и глубокой вытяжкой.

Все латуни по способу производства делят на две группы: *деформируемые* (например, ЛС59-1, ЛАЖ60-1-1), из которых изготавливают листы, ленты, трубы, проволоку и другие полуфабрикаты, и *литейные* (например, ЛЦ40С, ЛЦ40МцЗЖ) для *фасонного литья*. Латуни, предназначенные для фасонного литья, содержат больше присадок, улучшающих их литейные свойства.

Основным видом термической обработки латуней является смягчающий отжиг перед пластическим деформированием при 600...700°C с медленным охлаждением. Если требуется повышение прочности и твердости для многофазных латуней, охлаждение с указанных температур проводят ускоренно.

Латуни, за исключением содержащих свинец, легко поддаются обработке давлением в холодном и горячем состояниях. Все латуни хорошо паяются твердыми и мягкими припоями. Хорошие технологические и широкий диапазон потребительских свойств, красивый цвет и сравнительная дешевизна латуни делают их наиболее распространенными медными сплавами.

При вылеживании или эксплуатации в латунных изделиях иногда возникают трещины — *сезонное растрескивание*. Это явление наблюдается главным образом в латунях с содержанием более 20% Zn и отчетливо обнаруживается в изделиях, полученных холодной деформацией (прутках, полых изделиях и др). Сезонное растрескивание усиливается в химически активных средах. Образование трещин является в этом случае результатом совместного действия остаточных напряжений, вызванных холодной деформацией, и химически активными средами.

2.4.1.3. Бронзы

Бронзами называют сплавы меди с различными элементами, среди которых олово, алюминий, кремний, бериллий, свинец и др. Конкретное наименование бронзы получают по основному легирующему элементу системы, образующей сплав, например оловянные бронзы. Цинк и никель могут вводиться в бронзы как дополнительные легирующие элементы.

Фазовый состав бронз описывается диаграммами состояния двух основных элементов, например для оловянных бронз диаграммой Cu — Sn. Структура и свойства бронз изменяются в зависимости от скорости охлаждения кристаллизующихся сплавов, вида термической обработки и характера обработки давлением. Примеси сурьмы, мышьяка, висмута, серы, цинка и фосфора отрицательно влияют на все виды бронз, понижая их механические и технологические свойства.

Бронзы немагнитны, коррозионно-стойки, имеют высокие коэффициенты тепло- и электропроводности, обладают антифрикционными свойствами. Для улучшения свойств их подвергают термической обработке: отжигу, закалке и отпуску или пластическому деформированию с целью наклепа. Отжиг проводится для снятия напряжений, устранения наклепа, получения однородной структуры; закалка от 700...750°C без отпуска — для увеличения пластичности, а с отпуском — для повышения твердости и прочности бронзы. Большинство бронз (за исключением алюминиевых) хорошо поддаются сварке и пайке твердыми и мягкими припоями.

Бронзы маркируются буквами Бр, далее следует буквенное и цифровое обозначение содержащихся элементов (обозначение меди не указывается, а содержание определяется по разности). В марке обрабатываемых давлением бронз после букв Бр стоит буквенное обозначение легирующих элементов в порядке убывания их концентраций, а в конце в той же последовательности через дефис указываются концентрации соответствующих элементов. Например, БрОФ10-1 — бронза оловянно-фосфорная, содержащая 10% Sn и 1% Р. В литейных бронзах после каждого буквенного обозначения легирующего элемента указывается его содержание.

Оловянные бронзы. В соответствии с диаграммой фазового равновесия Cu — Sn предельная растворимость олова в меди составляет 15,8%. Оловянные бронзы могут содержать до 14% олова, с повышением содержания которого увеличиваются их твердость и прочность (рис. 60).

Практическое значение, однако, имеют бронзы, содержащие до 10% Sn, так как увеличение содержания олова вызывает появление твердой и хрупкой δ -фазы, снижающей вязкость и пластичность сплава. Из-за высокой стоимости олова чаще используют бронзы, в которых часть олова заменена цинком (или свинцом).

Дополнительное легирование осуществляют Zn, Pb, Ni и Р. Фосфор (до 0,3%) улучшает литейные свойства, а при увеличении его содержания до 1% повышаются твердость и износостойкость бронз. Свинец и цинк улучшают обрабатываемость резанием и антифрикционные свойства.

Оловянные бронзы имеют следующие механические характеристики: в отожженном состоянии — $\sigma_b = 300...320$ МПа, $\delta = 30...35\%$, твердость 60...65 НВ; в наклепанном — $\sigma_b = 500...520$ МПа, $\delta = 5\%$ при 180 НВ.

Рис. 60. Влияние содержания олова на фазовый состав (а) и механические свойства (б) оловянных бронз (показан неравновесный солидус диаграммы состояния)

Оловянные бронзы обладают высокими антифрикционными (более высокими у двухфазных сплавов) и упругими свойствами, коррозионно-стойки в атмосфере и пресной воде. Они хорошо обрабатываются резанием, паяются, хуже свариваются, чем другие бронзы, имеют самую низкую линейную усадку.

По способу изготовления изделий оловянные бронзы подразделяются на литейные и деформируемые.

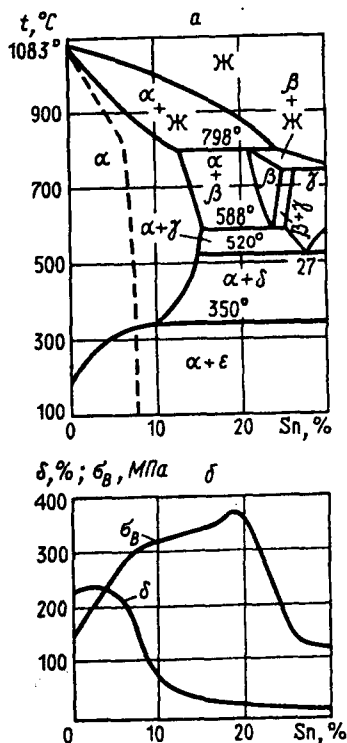
В машиностроении в настоящее время используют 11 марок литейных оловянных бронз. Из бронз марок БрОФ10-1, Бр04Ц4С17 и др. (ГОСТ 613—79) отливаются подшипники скольжения, слитки, идущие на изготовление лент, прутков, профилей, проволоки для пружин. Оловянные бронзы применяют также для литых деталей сложной формы. Однако для арматуры котлов и подобных деталей они используются лишь при небольших давлениях пара, так как имеют значительную микропористость. Из деформируемых оловянных бронз БрЩЦ4-3, БрОФ8,5-0,3 (ГОСТ 5017—74) изготавливают детали, выдерживающие очень высокие нагрузки: опорные шайбы, шестерни, пружины и др.

Алюминиевые бронзы содержат 5...11% Al. Они являются самыми распространенными дешевыми заменителями оловянных бронз и даже превосходят их по ряду свойств:

- менее склонны к ликвационным явлениям;
- обладают лучшей жидкотекучестью, обеспечивающей получение плотных отливок (без микропористости);
- характеризуются сравнительно высокими прочностными показателями, жаропрочностью, химической стойкостью (кроме перегретого пара) и др.

Отрицательным свойством алюминиевых бронз является то, что они трудно поддаются пайке твердыми и мягкими припоями.

Бронзы, содержащие до 7,4% Al, однофазны (рис. 61). Они очень пластичны и используются для изготовления полуфабрикатов различного профиля. Эти бронзы стойки к истиранию. Бронза марки БрА5



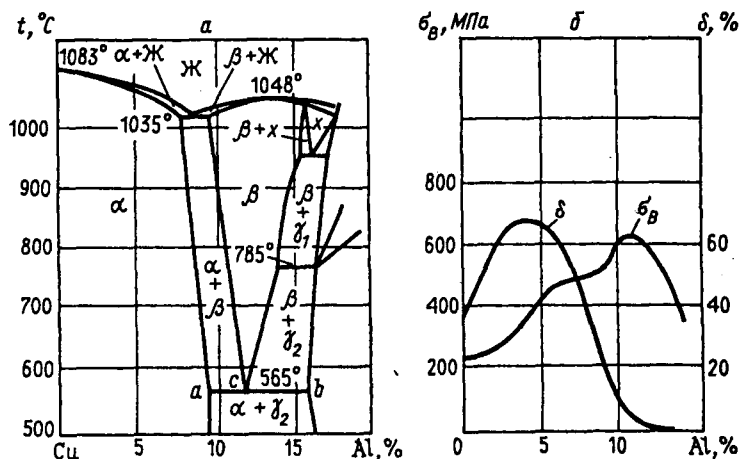


Рис. 61. Влияние содержания алюминия на фазовый состав (а) и механические свойства (б) алюминиевых бронз

является монетной, БрА7 предназначена для изготовления ленты, листов, а после холодной прокатки — проволоки для упругих элементов и токоведущих пружин.

Двухфазные алюминиевые бронзы обычно легируют. В качестве легирующих добавок в алюминиевых бронзах используют Ni, Mn и Fe. Никель повышает механические и физико-химические свойства, жаростойкость и жаропрочность до 400...500 $^\circ\text{C}$, коррозионную устойчивость и температуру рекристаллизации алюминиевых бронз. Добавки марганца повышают технологические и коррозионные свойства. Алюминиевые бронзы с марганцем отличаются повышенной морозостойкостью и отлично обрабатываются давлением в горячем и холодном состояниях. Добавка железа, особенно в комплексе с марганцем и никелем, приводит к повышению прочности и износостойкости бронз, увеличению их коррозионной стойкости.

Из БрАЖМц10-3-1,5 изготавливают фасонные отливки, шестерни, втулки, а из БрАНЖ10-4-4 — ответственные детали авиационных двигателей и турбин. Алюминиевые бронзы со свинцом обладают повышенными антифрикционными свойствами и применяются для изготовления литых подшипников и втулок. Литейные свойства у алюминиевых бронз ниже, чем у оловянных.

Кремнистые бронзы содержат до 3,0% Si. Основными легирующими элементами являются Mn и Ni. Применение кремнистых бронз ограничено только однофазными сплавами, так как они более пластичные.

Кремнистые бронзы превосходят алюминиевые бронзы и латуни в прочности и стойкости в щелочных (в том числе сточных) средах. Они

применяются для изготовления труб и арматуры, эксплуатируемых в указанных условиях. Дополнительно легированные марганцем бронзы (БрКМц3-1) в результате сильной холодной деформации приобретают повышенные прочность и упругость и используются в виде ленты (или проволоки), а также для изготовления коррозионностойких пружин, втулок и других упругих элементов, заменяя в машиностроении дорогостоящие оловянные и бериллиевые бронзы при температурах эксплуатации до 250°C. Кремнистые бронзы легко обрабатываются давлением, резанием и свариваются.

Бериллиевые бронзы содержат 1,8...2,5% Be, применяются в промышленности после упрочнения путем закалки и отпуска. Структура этих бронз (например, БрБ2) после термической обработки содержит выделения CuBe, очень дисперсные и расположенные определенным образом внутри зерен твердого раствора. Образование высокодисперсных включений CuBe приводит к очень большому упрочнению бронз: $\sigma_B = 1200...1300$ МПа, твердость 350...400 НВ при снижении пластичности до 1,2...2%. Кроме того, упрочненные бериллиевые бронзы характеризуются исключительно высокой упругостью и повышенной электропроводностью. Они хорошо обрабатываются резанием и свариваются. Недостаток бронзы БрБ2 — высокая токсичность паров бериллия, что требует соответствующей техники безопасности при плавке.

Бериллий отличается очень высокой токсичностью. Попадая в легкие, он вызывает тяжелое легочное заболевание (бериллиоз). На коже бериллиевая пыль вызывает зуд, а при попадании в ранки — опухоли и язвы. В атмосфере производственных помещений не допускается содержание бериллия более 0,001 мг/м³.

Основными легирующими элементами бериллиевых бронз являются Mn, Ni, Fe, Co, Ti и др. Mn вводится как заменитель бериллия для уменьшения стоимости, Ti, Ni и др. играют роль упрочнителей, поскольку образуют различного рода химические соединения; Ni, Fe и Co замедляют процесс фазовых превращений, что значительно облегчает технологические процессы закалки; Ni задерживает рекристаллизацию бериллиевой бронзы и способствует получению более равномерной структуры. Введение магния в количестве 0,1% увеличивает эффект дисперсионного упрочнения, но дальнейшее повышение его концентрации до 0,25% и более приводит к значительному снижению пластичности.

Бериллиевые бронзы из-за высокой стоимости используются для изготовления особо ответственных изделий (контрольно-измерительных приборов, специальных инструментов), в качестве контактов, разъемов, штырей, а также различных упругих элементов (лент, пружин, проволоки и др.) в авиационной аппаратуре, радиотехнике, средствах связи, атомной и космической технике. Антифрикционные свойства этих бронз учитываются

при изготовлении подшипников, эксплуатируемых при больших скоростях, давлениях и повышенных температурах, а также шестерен, зубчатых колес, червячных передач и др.

Важной технологической характеристикой бериллиевых бронз, в частности БрБ2, является величина коробления (деформации). Особенно нежелательна эта деформация в точных изделиях особо малой жесткости, на которые устанавливают строгие допуски по размерам. Для уменьшения величины деформации на всех приборостроительных заводах старение изделий из бериллиевых бронз проводят в специальных зажимах.

Свинцовые бронзы содержат 27...33% Рв. Свинец практически не растворяется в жидкой меди, и поэтому сплавы бронз после затвердевания имеют микроструктуру, состоящую из зерен меди и эвтектики (Cu + Pb), залегающей по границам зерен меди в виде каплеобразных скоплений. Такая микроструктура бронзы обеспечивает ее высокие антифрикционные свойства.

Свинцовые бронзы (например, БрС30) обладают более высокой теплостойкостью, чем оловянные, и допускают нагревы до 300...320°C. При таких температурах свинцовые включения подплавляются и жидкий свинец выполняет функции смазочного материала, уменьшающего коэффициент трения. Недостатком сплава БрС30 является склонность к ликвации по плотности.

Свинцовые бронзы легируют оловом и никелем, которые, растворяясь в меди, повышают износостойкость бронз (БрОС8-12, БрСН60-2,5). Невысокие механические свойства этих бронз ($\sigma_b = 60$ МПа, $\delta = 4\%$) позволяют использовать их в технике в основном в качестве биметаллических подшипников. Такие подшипники отличаются простотой изготовления (бронзу наплавляют тонким слоем на стальные ленты или трубы) и возможностью замены при изнашивании.

Биметалл — композиционный материал из двух слоев разнородных металлов или сплавов (например, сталь и алюминий), применяемый для повышения прочности и жаростойкости конструкций, снижения их массы или как материал со специальными свойствами.

2.4.1.4. Медно-никелевые сплавы

Медно-никелевыми называют *сплавы* на основе меди, в которых легирующим элементом, определяющим основные свойства сплава, является никель. Медь с никелем образует непрерывный ряд твердых растворов. Добавка никеля к меди увеличивает твердость, прочность и электросопротивление, уменьшает термический коэффициент электросопротивления и повышает коррозионную стойкость во многих средах.

Медно-никелевые сплавы выделены в особую группу (ГОСТ 492—73). По направлению использования их делят на *конструкционные* (мельхиор,

нейзильбер, куниаль) и *электротехнические* (копель, константан, манганин).

Маркировка этих сплавов образована из букв МН и цифры, указывающей суммарное содержание Ni + Co, например МН19 — медно-никелевый сплав, содержащий 19% (Ni + Co), остальное — медь. Если сплав легируется, в марке указывают введенные элементы и их содержание через дефисы в порядке их упоминания.

Мельхиор — сплав Cu (основа) главным образом с Ni (5...30%). Например, мельхиоры МН19 и МНЖМц30-0,8-1 — однофазные сплавы из α -твердого раствора серебристого цвета; $\sigma_b = 350...400$ МПа. Они обладают высокой коррозионной и кавитационной стойкостью на воздухе и в воде, хорошей обрабатываемостью. Из мельхиоров изготавливают конденсаторные трубы в морском судостроении, трубы термостатов, медицинский инструмент, детали точной механики, химической аппаратуры, монеты, изделия массового потребления.

Нейзильбер — сплав Cu (основа) с Ni (5...35%) и Zn (13...45%). Обладает высокими коррозионной стойкостью и прочностью; при повышении содержания Ni нейзильбер приобретает красивый белый цвет с зеленоватым или синеватым отливом.

Нейзильбер МНЦ15-20 — однофазный сплав α -твердого раствора Ni + Zn + Co в меди; $\sigma_b = 500...700$ МПа. Обладает высокими коррозионной стойкостью и упругостью, хорошей полируемостью; легко обрабатывается давлением в холодном состоянии. Применяется в электротехнике (плоские пружины, реле, проволока для термопар и реостатов), автомобилестроении (игольчатые клапаны карбюраторов). Из него изготавливают приборы точной механики, плоские пружины реле, медицинский инструмент, паровую и водяную арматуру, художественные изделия, монеты.

Куниаль — сплав Cu (основа) с Ni (4...20%) и Al (1...4%). Обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, пресной и морской воде; по прочности не уступает некоторым конструкционным сталям. Куниаль А (МНА 13-3) применяется для изготовления деталей машин повышенной прочности; куниаль Б (МНА 6-1,5) — для изготовления пружин и других изделий электротехнической промышленности.

Копель — сплав Cu (основа) с Ni (43%) и Mn ($\approx 0,5\%$), **константан** — сплав Cu (основа) с Ni ($\approx 40\%$) и Mn ($\approx 1,5\%$), а также **манганин** — сплав Cu (основа) с Mn (11...13,5%) и Ni (2,5...3,5%) — относятся к сплавам с высоким удельным электрическим сопротивлением, мало зависящим от температуры. Рабочая температура копей около 600°C , константана — 500°C , а манганина — от 15 до 35°C . Копель (например, МНМц43-0,5) и константан (например, МНМц40-1,5) идут на производство проволоки для измерительных и нагревательных приборов, термопар, компенсационных проводов, точных резисторов. Манганин (МНМц3-12) характеризуется сочетанием низкого термического коэффициента электросопротивления и очень малой термо-ЭДС в паре с медью, что обуславливает его применение в электротехнических измерительных приборах и резисторах.

2.4.2. Алюминий и сплавы на его основе

Алюминий (Al) — химический элемент III группы периодической системы, атомный номер 13, атомная масса 26,98154. Серебристо-белый металл с гранцентрированной кубической решеткой, $t_{пл} = 660^\circ\text{C}$, плотность 2700 кг/м³.

Механические свойства отожженного алюминия высокой чистоты характеризуются невысокими прочностью и твердостью при достаточно высокой пластичности: $\sigma_b = 50$ МПа; $\sigma_{0,2} = 15$ МПа; $\delta = 50\%$, $\psi = 35\%$; $E = 71\,000$ МПа (в три раза меньше, чем стали); твердость 170 НВ. Прочностные свойства технического алюминия выше. Холодная пластическая деформация повышает предел прочности алюминия, но относительное удлинение снижается.

Алюминий характеризуется высокими электро- и теплопроводностью. Теплопроводность при 190°C составляет 343 Вт/(м · К); электропроводность алюминия составляет 0,65 величины электропроводности меди. Алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью к действию различных типов природных вод, азотной и органических кислот. Чем чище алюминий, тем выше его коррозионная стойкость. На воздухе алюминий покрывается тонкой прочной пленкой, предохраняющей металл от дальнейшего окисления и коррозии.

Среди технологических свойств у алюминия следует отметить хорошие обрабатываемость давлением, свариваемость (сваривается не всеми видами сварки), полируемость (отражательная способность до 90%), анодируемость и сравнительно плохую обрабатываемость резанием.

Маркировка алюминия проводится по ГОСТ 11069—74: особой чистоты — А999 (99,999% Al), высокой чистоты — А995 (99,995% Al), А99 (99,99% Al), А97 (99,97% Al), А95 (99,95% Al) и технической чистоты — А85, А8, А7, А6, А5, А0 (99,0% Al). В качестве примесей в алюминии присутствуют Fe, Si, Cu, Mn, Zn. Технический деформируемый алюминий маркируют АД0 и АД1. Технический алюминий изготавливают в виде листов, профилей, прутков, проволоки и других полуфабрикатов.

По объему производства алюминий и сплавы на его основе занимают первое место среди нежелезных металлических материалов. Алюминий применяется для изготовления элементов конструкций и деталей, не несущих нагрузки, например трубопроводов, палубных надстроек; в машино- и авиастроении; заменяет медь при производстве массивных проводников (кабелей, шин, конденсаторов и др.); в металлургии как легирующую добавку используют в сплавах Cu, Mg, Ti, Ni, Zn, Fe и др.; в пищевой и химической промышленности используется как материал для хранения и транспортировки пищевых продуктов, воды и др., а также для изготовления предметов домашнего обихода. Чистый и сверхчистый алюминий применяют в полупроводниковой технике и для получения разного рода зеркал.

Алюминиевые сплавы благодаря более высоким технологическим и потребительским свойствам, шире применяются в промышленности, чем чистый или технический алюминий. Преимуществами алюминиевых сплавов являются высокие значения прочности (σ_b — до 600 МПа), удельной прочности ($\sigma_b/\rho = 21$), коррозионной стойкости, тепло- и электропроводности. Алюминиевые сплавы входят в группу легких сплавов (при одинаковой прочности изделия из алюминиевых сплавов в 3 раза легче стальных). Однако они уступают сплавам на железной основе по величине модуля упругости почти в 3 раза, малопригодны для упрочнения поверхностного слоя способами химико-термической обработки, и их твердость и износостойкость ниже, чем стали. Некоторые из них не обладают хорошей свариваемостью.

Наибольшее применение для легирования алюминиевых сплавов находят элементы, формирующие упрочняющие фазы и зоны (Cu, Si, Mg, Mn, Zn Fe, реже — Li, Ni, Ti). Марганец одновременно повышает коррозионную стойкость, а кремний участвует в образовании эвтектики в литейных сплавах. Литий в сплавах способствует возрастанию их модуля упругости. Однако магний и марганец снижают тепло- и электропроводность алюминия, а железо — его коррозионную стойкость.

Характерной особенностью структуры алюминиевых сплавов является их фазовый состав, включающий твердый раствор и интерметаллидные фазы (CuAl_2 , Al_2CuMg , Al_3Mo и др.).

Алюминиевые сплавы классифицируются *по составу и основным потребительским свойствам, способу производства и возможности упрочнения термической обработкой*.

Алюминиевые сплавы по составу и потребительским свойствам делят на следующие группы:

- *сплавы высокой прочности* ($\sigma_b = 400\ldots 500$ МПа у большинства сплавов и до 600 МПа у сплавов В95), имеющие сложный химический состав; главными легирующими элементами являются медь и магний, а у сплава В95 — цинк;

- *жаропрочные сплавы*, которые используются при температурах эксплуатации до $300\ldots 350^\circ\text{C}$ (ниже, чем у жаропрочных сталей и титановых сплавов). Эти сплавы при меньшем содержании меди дополнительно легируются никелем;

- *сплавы повышенной пластичности*, содержание меди в которых ограничивается 0,5%, вследствие этого прочность сплавов ниже 250 МПа, а пластичность выше, чем у дуралюминов;

- *сплавы повышенной пластичности, свариваемости и стойкости против коррозии*, которые не содержат меди и дополнительно легируются магнием (реже марганцем);

- *антифрикционные сплавы*, представляющие собой сплавы алюминия с оловом, никелем, медью и другими элементами.

По способу производства алюминиевые сплавы делят на *литейные* и *деформируемые* (прокаткой, прессованием, штамповкой). Области составов литейных и деформируемых сплавов показаны на рис. 62. В каждой из этих групп существуют подгруппы сплавов, упрочняемых и не упрочняемых термической обработкой.

Подавляющее большинство литейных сплавов являются доэвтектическими; заэвтектические сплавы из-за охрупчивающего влияния интерметаллидов не используют. Лучшими литейными свойствами обладают эвтектические или близкие к ним по составу сплавы. Поэтому широкое распространение получили сплавы алюминия с элементами, которые образуют с ним легкоплавкие эвтектики (Al—Si, Al—Cu, Al—Mg, Al—Cu—Mn, Al—Cu—Mn—Mg и др.). Литейные сплавы, сочетающие высокую прочность и пластичность, находятся по составу несколько левее точки предельной растворимости при эвтектической температуре (см. рис. 62).

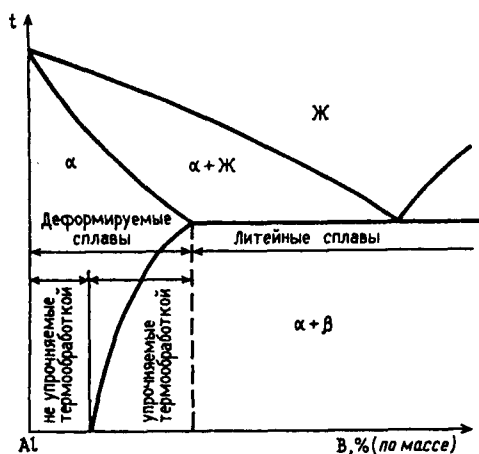


Рис. 62. Области составов деформируемых и литейных алюминиевых сплавов на схеме диаграммы состояния «Al — основной легирующий элемент B»

Литейные не упрочняемые термической обработкой алюминиевые сплавы классифицируют как *сплавы низкой прочности* (АЛ2) и *антифрикционные* (АСМ, А020-1, А09-2), а упрочняемые термической обработкой — как *сплавы нормальной прочности, высокопрочные* (АЛ27, АЛ32) и *жаропрочные* (АЛ19) сплавы.

Замена чугуна и стали литейными алюминиевыми сплавами позволяет получать значительный технико-экономический эффект за счет снижения массы (металлоемкости) конструкций; повышения эксплуатационной надежности и долговечности; уменьшения трудоемкости благодаря применению более точных литых заготовок, а также более легкой обрабатываемости резанием.

Для деформируемых сплавов характерна структура твердого раствора с небольшой долей эвтектики. Такие сплавы хорошо подвергаются прессованию, прокатке, гибке, вальцовке и используются для изготовления полуфабрикатов (профили, листы, проволока и др.) из слитков.

Среди деформируемых алюминиевых сплавов особое место занимает сплав 1420 системы Al—Mg—Li—Zr, который отличается самой низкой плотностью (2470 кг/м^3) и обеспечивает высокую удельную прочность ($\sigma_b/\rho = 17 \text{ Дж/кг}$) и снижение массы сварных конструкций до 20...25%. Сплавы типа АМг называют *магналиями*. Они занимают первое место по объему производства среди деформируемых алюминиевых сплавов, что определяет такие их качества, как высокая стойкость против коррозии и хорошая свариваемость. Перспективно использование этих сплавов в автомобиле- и тракторостроении для деталей двигателей и систем распределения выхлопных газов (патрубков, фланцев и т.д.)

Деформируемые не упрочняемые термической обработкой алюминиевые сплавы определяют как *сплавы повышенной пластичности* (АМц, АМг). Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой, классифицируют на *сплавы нормальной прочности* (Д1, ..., Д19), *высокопрочные* (В95, ВАД23), *повышенной пластичности при комнатной* (Д18) и *повышенной* (АК40) *температурах* и *коррозионно-стойкие* (АД31, АД33).

В настоящее время согласно ГОСТ 4784—97 для алюминия и сплавов на его основе предложены буквенная, буквенно-цифровая и цифровая маркировки. Наряду с этим имеется буквенно-цифровая маркировка видов технологической обработки полуфабрикатов и изделий, качественно отражающая механические, химические и другие свойства сплава. При буквенной маркировке алюминиевых сплавов последовательно указываются компоненты сплава — АМг, АМц. При буквенно-цифровой маркировке можно выделить следующие закономерности:

1. Для литейных алюминиевых сплавов введена единая система буквенно-цифровой маркировки (ГОСТ 1583—89), аналогичная применяемой для сталей: первая буква А показывает Al, последующие буквы — основные легирующие компоненты (К — кремний, М — медь, Мг — магний, Мц — марганец, Н — никель, Ц — цинк), числа, стоящие после букв, показывают среднее содержание данного компонента в процентах по массе. Если содержание компонента меньше единицы, буква, обозначающая данный компонент в марке, как правило, не указывается. ГОСТ 1583—89 предусматривает указание в скобках старой марки сплава.

2. Для деформируемых сплавов буквами в начале марки указывают: А — технический алюминий; Д — сплав типа дуралюмина; К — ковошный сплав; В — высокопрочный сплав. Цифрами обозначен условный номер сплава, после которого буквенно-цифровой маркировкой указано состояние сплава с учетом технологии его получения: М — мягкий

(отожженный); Т — термически обработанный (закалка и естественное старение); Н — нагартованный (подвергнутый холодной пластической деформации); П — полунагартованный и др.

В цифровой маркировке цифра 1 на первом месте означает, что основой является алюминий. Вторая цифра характеризует химический состав, последние две цифры указывают номер сплава. В номере сплава также оговорено, что последняя цифра будет нести информацию о способе производства и назначении сплава, например 0 или нечетная цифра — деформируемый сплав; четная цифра — литейный сплав; 9 — металло-керамический сплав; 7 — проволочный сплав.

Примеры обозначения сплавов с помощью буквенно-цифровой и цифровой маркировок приведены в табл. 7.

Таблица 7

Примеры маркировок алюминиевых сплавов

Легирующий элемент	Маркировка		Легирующий элемент	Маркировка	
	буквенно-цифровая	цифровая		буквенно-цифровая	цифровая
Al (чистый)	АД00	1010	Cu, Mg, Mn, Si	АК6 АК8	1360 1380
Mn	АМц	1400	Cu, Mg, Fe, Ni, Si	АК4 АК4-1	1140 1141
Mg — Mn	АМг АМг5	1510 1550	Zn — Mg	—	1911
Mg — Si	АВ	1343	Zn — Mg — Cu	В95 В96Ц1	1950 1960
Cu — Mg	Д1 Д16 ВАД1 Д18	1100 1160 1191 1187	Cu — Mn	Д20 —	1200 1201

К наиболее распространенным промышленным алюминиевым сплавам относятся *силумин*, *дуралюмины*, *авиаль* и *антифрикционные сплавы*.

Силумины — легкие литейные сплавы Al (основа) с Si (4...13%, иногда до 23%) и некоторыми другими элементами (Cu, Mn, Mg, Zn, Ti, Be). Структура сплавов при содержании до 11,3% Si (доэвтектические сплавы) состоит из первичных кристаллов α -твердого раствора (кремния в алюминии) и эвтектики (α + Si). При более высокой концентрации кремния (заэвтектические сплавы) в структуре сплавов кроме эвтектики присутствуют первичные кристаллы кремния в виде пластинок, причем пластинчатая форма кремния в эвтектике обуславливает низкие механические свойства силумина. В специальных модифицированных

силуминах могут образоваться частицы CuAl_2 и Mg_2Si . При термической обработке в результате закалки эти фазы растворяются, а после старения, выделяясь в дисперсной форме, упрочняют сплав.

Силумины используются в крупносерийном производстве мало- и средненагруженных деталей, в том числе для деталей пневмо- и гидросистем, так как обладают хорошей герметичностью благодаря узкому интервалу кристаллизации и большому количеству эвтектики. Из них изготавливают детали сложной конфигурации, например корпуса отбойных молотков, сверл и др. К группе силуминов относятся также поршневые сплавы (например, AK12M2MgH), сочетающие жаропрочность, износостойкость и размерную стабильность.

Дуралюмины — большая группа сплавов на основе алюминия с Cu (2,2...5,2%), Mg (0,2...2,7%) и Mn (0,2...1%). Дуралюмины относятся к деформируемым (ковкой, прокаткой, прессованием или волочением) и упрочняемым термической обработкой сплавам. Термическая обработка обычно состоит из отжига, закалки и естественного или искусственного старения. Длительность старения определяется величиной требуемых механических свойств.

В структуре дуралюминов после отжига присутствуют фазы: α -твердый раствор (основа) и химические соединения Mg_2Si , $\text{W}(\text{Al}_x\text{Cu}_y\text{Mg}_z\text{Si}_u)$ и др., в том числе содержащие железо. Структурой сплавов после закалки является практически однофазный пересыщенный α -твердый раствор. При естественном или искусственном старении в решетке α -твердого раствора возникают группировки, образованные атомами легирующих элементов (меди, магния, кремния); причем состав этих группировок при максимально достигаемом упрочнении близок к составу соответствующих избыточных фаз (Mg_2S , W и др.). Такие группировки называют **зонами Гинье—Престона**. Естественное старение более благоприятно для дуралюмина, так как придает ему большую коррозионную стойкость и вязкость при разрушении, т.е. он менее подвержен хрупкому разрушению.

Дуралюмины применяются как конструкционный материал для авиационного и транспортного машиностроения. Для повышения стойкости против коррозии некоторые сплавы, главным образом дуралюмины, *плакируют*, т.е. покрывают защитным слоем алюминия (что, однако, снижает прочность и износостойкость).

Плакирование — нанесение методом горячей прокатки или прессования на поверхность металлических листов, плит, труб, проволоки тонкого слоя другого металла или сплава (например, латунного покрытия на стальные листы).

Авиаль — сплав Al (основа) с добавками Mg , Si , Mn (или Cr), Cu (в сумме около 3%). Эти алюминиевые сплавы относятся к наименее

легированным. Фазой-упрочнителем является силицид Mg_2Si . Авиали подвергают закалке с 510...530°C и старению при 160...170°C в течение 10...12 ч. Авиали относятся к числу сплавов со средней прочностью, но высокими технологичностью и стойкостью против атмосферной коррозии. Они имеют красивый внешний вид после цветного анодирования. Из них изготавливают кованные и штампованные детали сложной формы. Сплав АД31 широко используют в строительстве (оконные и дверные рамы), для внутренней отделки кабин самолетов и автомобилей; из сплава АВ изготавливают лонжероны лопастей винтов вертолетов.

Антифрикционные алюминиевые сплавы (ГОСТ 14113—78) представляют собой сплавы алюминия с оловом (АОЗ-7, АО9-2, АО9-1, АО20-1, АО6-1), никелем (АН-2,5), медью и другими элементами (АСМ, АМСТ). Применяются для отливки моно- и биметаллических вкладышей и втулок, для получения биметаллической ленты со сталью и дуралюмином методом прокатки с последующей штамповкой вкладышей с толщиной антифрикционного слоя менее 0,5 мм. Такие подшипники применяются при нагрузке на них 200...350 (до 400) кг/мм², скорости вращения вала 10...15 (до 20) м/с и температуре масла 100...120°C.

Материалы и изделия на основе алюминия

Полуфабрикаты и изделия на основе алюминия получают путем создания конструкционно-облицовочных материалов с разнообразными защитно-декоративными полимерными, лакокрасочными, эмалевыми и электротехническими покрытиями.

Фольгоизол — рулонный двухслойный материал из тонкой рифленой или гладкой алюминиевой фольги, покрытой с нижней стороны защитным битумно-резиновым составом. Это долговечный материал, не требующий ухода в течение всего периода его эксплуатации. Он предназначен для устройства кровель и парогидроизоляции зданий и сооружений, герметизации стыков. Внешняя поверхность фольгоизола может быть окрашена лаками в различные цвета.

Фольгорубероид — гидроизоляционный материал из алюминиевой фольги, покрытый с обеих сторон битумной мастикой; выпускают двух марок, отличающихся толщиной алюминиевой фольги. Имеет высокую прочность на разрыв и долговечность. Применяют для гидроизоляции подземных и гидротехнических сооружений.

2.4.3. Магний и сплавы на его основе

Магний (Mg) — химический элемент II группы периодической системы, атомный номер 12, атомная масса 24,305; металл серебристо-белого цвета. Кристаллическая решетка магния гексагональная плотно упакованная. Температура плавления $t_{пл} = 651^\circ C$. Плотность магния — 1739 кг/м³.

Магний маркируется по чистоте и выпускается трех марок (ГОСТ 804—93): МГ90 (99,9% Mg), МГ95 (99,95% Mg), МГ96 (99,96% Mg). Механические свойства литого магния: $\sigma_{\text{в}} = 115$ МПа; $E = 43000$ МПа; $\delta = 8\%$; твердость 30 НВ.

Величина механических свойств магния может быть увеличена практически в 2 раза пластическим деформированием.

Чистый магний имеет малую устойчивость против коррозии. На воздухе при температурах ниже 450°C магний покрывается оксидной пленкой, которая обладает защитными свойствами; при более высоких температурах эта пленка становится рыхлой и легко пропускает кислород к поверхности металла. На воздухе при температурах выше 623°C магний легко воспламеняется.

Изделия из магния не изготавливают, он применяется главным образом в производстве легких сплавов, для раскисления и обессеривания некоторых металлов, для восстановления Hf, Ti, U, Zr и других металлов из соединений (*металлотермия*). Чистый магний используется в пиротехнике и химической промышленности.

Магниевоы сплавы. Основное преимущество магниевых сплавов по сравнению с остальными промышленными металлами — небольшая плотность (1700...1800 кг/м³). Все магниевые сплавы имеют сравнительно высокую прочность ($\sigma_{\text{в}} = 200...400$ МПа, $\delta = 6...20\%$), хорошо поглощают вибрации. Однако из-за пониженного ($4,3 \cdot 10^4$ МПа) модуля упругости пригодны лишь для мало нагруженных деталей. Магниевоы сплавы обладают низкой коррозионной стойкостью, особенно в контакте с другими металлами. Недостатком также являются трудности литья и обработки давлением. Магниевоы сплавы удовлетворительно свариваются дуговой сваркой в защитной среде инертных газов и хорошо обрабатываются резанием.

По влиянию на пластичность магния легирующие элементы можно разбить на две группы: а) элементы, уменьшающие пластичность (Mn, Si); б) элементы, повышающие пластичность при их введении до определенной концентрации (Li, Zn, Al, Sc, Ce). Максимальная прочность магниевых сплавов при комнатной температуре достигается при концентрациях легирующих элементов, близких к пределу насыщения твердых растворов при температурах их максимальной растворимости. При температурах 150...200°C наиболее сильно повышает жаропрочные свойства магния неодим, а в несколько меньшей степени — торий. При температурах 250...300°C, наоборот, торий обеспечивает более высокую твердость, чем неодим.

Магниевоы сплавы подвергают термической обработке — диффузионному отжигу (*гомогенизации*) после литья и рекристаллизационному отжигу после пластической деформации. Некоторые сплавы могут быть

упрочнены (на 20...35%) закалкой и старением, пластичность сплавов при этом уменьшается.

Гомогенизация — придание однородности строения и состава металлам, сплавам, растворам, эмульсиям и др.

Магниевые сплавы классифицируют *по способу производства, уровню прочности, плотности, возможным температурам эксплуатации и чувствительности к упрочняющей термической обработке.*

По способу производства магниевые сплавы делят на *литейные* (МЛ5, МЛ5пч, МЛ10, МЛ12) и *деформируемые* (МА1, МА2-1, МА14). Химические составы магниевых сплавов даны в ГОСТ 14957—76 (деформируемые сплавы) и ГОСТ 2856—79 (литейные сплавы). Достоинствами магниевых литейных сплавов являются малая плотность, высокая удельная прочность, способность к поглощению энергии удара и вибрационных колебаний, а также хорошая обрабатываемость резанием.

Изделия из этих сплавов используются в различных отраслях народного хозяйства: авиастроении (детали пассажирских кресел, колес, двигателей и агрегатов), транспортном машиностроении (детали двигателей, диски колес, корпуса лодочных моторов), радиотехнической и электронной промышленности (детали оптических приборов, радио- и киноаппаратуры). Детали из современных магниевых сплавов могут длительно работать при температурах выше 300°C и кратковременно при температуре 400°C.

Деформируемые сплавы после литья имеют структуру α -твердого раствора и избыточной фазы типа Mg_3Al_2 . Использование таких сплавов дает высокую массовую эффективность: для крупных корпусных деталей экономия по массе составляет 21, 57 и 111% по сравнению с алюминиевыми, титановыми и стальными деталями соответственно. Для снижения стоимости изделий из магниевых деформируемых сплавов (на 30%) и повышения уровня механических свойств используют гранульную технологию изготовления полуфабрикатов.

По уровню прочности магниевые сплавы разделяют на *малопрочные, средней прочности и высокопрочные*. По плотности магниевые сплавы делят на *легкие и сверхлегкие сплавы*. К сверхлегким сплавам относятся сплавы, легированные литием (МА21, МА18 — самые легкие конструкционные металлические материалы), а к легким сплавам — все остальные сплавы. По чувствительности к упрочняющей термической обработке различают *термически упрочняемые и термически неупрочняемые сплавы*.

При классификации по возможным температурам эксплуатации магниевые сплавы разбивают на группы:

- *сплавы общего назначения*, предназначенные для работы при обычных температурах;
- *жаропрочные сплавы* — для длительной эксплуатации при температурах до 200°C;

- **высокожаропрочные сплавы** — для длительной эксплуатации при температурах до 250... 300°С;
- **сплавы для эксплуатации при криогенных температурах.**

Магниевые сплавы используются для изготовления нагруженных и сварных деталей двигателей (коробки передач, тормозные барабаны и др.). В связи с малой устойчивостью к коррозии изделия из этих сплавов *оксидируются*, а затем на оксидированную поверхность наносят лакокрасочные покрытия.

Оксидирование — преднамеренное окисление поверхности металлических изделий, главным образом химическим или электрохимическим (*анодирование*) способом. Образующаяся оксидная пленка играет защитную (*пассивирование*), технологическую (подслой) или декоративную (*воронение*) роли.

2.4.4. Антифрикционные (подшипниковые) сплавы на оловянной, свинцовой и цинковой основах

Антифрикционность — способность материала обеспечивать низкий коэффициент трения скольжения и тем самым низкие потери на трение.

Антифрикционные сплавы — материалы с низким коэффициентом трения скольжения, достаточной твердостью, хорошей деформируемостью и пластичностью, способностью удерживать смазку на поверхности. Кроме того, антифрикционные материалы должны иметь низкую способность к адгезии, хорошую теплопроводность и быть коррозионно-стойкими в рабочей среде. Антифрикционные сплавы предназначены для заливки вкладышей подшипников скольжения, паровых турбин и др.

Основные потребительские свойства антифрикционных сплавов реализуются за счет структурных особенностей (рис. 63) — однородная, мягкая, пластичная основа с включением твердых частиц (например, SnSb). Мягкая основа должна обеспечивать хорошую прирабатываемость трущихся поверхностей, а равномерно распределенные в основе, хорошо полирующиеся твердые включения — уменьшать (наряду со смазкой) коэффициент трения. При вращении вал опирается на твердые частицы, обеспечивающие износостойкость, а основная масса, истирающаяся более быстро, прирабатывается к валу и образует сеть микроскопических каналов, по которым циркулирует смазка и уносятся продукты износа.

Большая часть подшипников скольжения изготавливаются из цветных сплавов на медной основе (латуни ЛКС80-3-3 и бронзы БрС30, БрОЦС5-5-5) и на основе алюминия. Широкое распространение получили также *бabbиты*.

Бabbиты — антифрикционные сплавы на основе Sn, Pb, Ca, Zn и др. с добавками Sb, Cu и других элементов, предназначенные для заливки

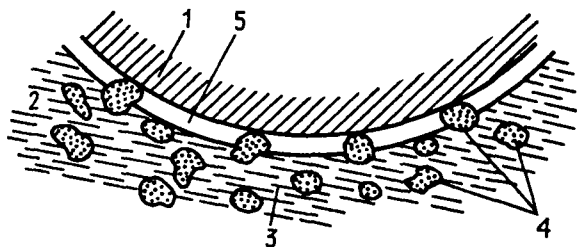


Рис. 63. Схемы работы пары трения «вал — вкладыш»:

1 — вал; 2 — вкладыш; 3 — мягкая основа материала; 4 — твердые включения; 5 — пространство, заполняемое смазкой, уменьшающей силы трения

вкладышей подшипников. Наименование баббитов определяется преобладающим по содержанию элементом основы. Каждый тип баббитов характеризуется температурой эксплуатации и степенью ответственности деталей, для которых применяется. Химический состав по легирующим элементам и назначение для антифрикционных сплавов установлены ГОСТ 1320—74, 1209—90 и 14113—78.

Оловянные баббиты базируются на системе Sn—Sb—Cu. Дополнительное легирование осуществляется Cu, Cd, As и Ni.

Олово (Sn) — химический элемент IV группы периодической системы элементов, атомный номер 50, атомная масса 118,69. Серебристо-белый металл, мягкий и пластичный; $t_{пл} = 231,9^\circ\text{C}$. Так называемое белое олово (β -Sn) с плотностью 7290 кг/м^3 полиморфно и ниже $13,2^\circ\text{C}$ переходит в серое олово (α -Sn) с плотностью 5850 кг/м^3 . На воздухе тускнеет, покрываясь пленкой оксида, стойкого к химическим реагентам. Около 59% используемого олова идет на производство баббитов, типографских и других сплавов. Олово применяется для покрытия других металлов, защиты их от коррозии (*лужение*), на изготовление белой жести для консервных банок, изготовление фольги и др.

Оловянные баббиты маркируются буквой Б, за которой следует цифра, показывающая содержание основного компонента — олова (остальное — сурьма и медь). Структура оловянных баббитов представляет собой гетерогенную систему, образованную α -твердым раствором, пронизанным длинноосными *дендритами* Cu_6Sn_5 , на которых равномерно распределены твердые, хорошо полирующиеся кристаллы SnSb. В столь сложной гетерогенной структуре имеются естественные капилляры, по которым под давлением поступает смазочный материал.

Дендриты — структурный элемент (иногда кристаллы) древовидной формы, образующийся в результате быстрой кристаллизации по тонким трещинам или в вязкой среде.

Оловянные баббиты (Б88, Б83) обладают наилучшим сочетанием антифрикционных и физико-механических свойств. Однако ввиду большого содержания дорогостоящего олова они применяются для заливки подшипников ответственного назначения тяжело нагруженных машин (турбин).

Свинцовые баббиты применяют для менее нагруженных подшипников, чем оловянные.

Свинец (Pb) — химический элемент IV группы периодической системы элементов, атомный номер 82, атомная масса 207,2. Синевато-серый металл, тяжелый, мягкий, ковкий; плотность 11340 кг/м^3 , $t_{\text{пл}} = 327,4^\circ\text{C}$, диамагнитен. На воздухе покрывается оксидной пленкой, стойкой к химическим воздействиям. Свинец не взаимодействует с соляной и серной кислотами. Наиболее широко используется для изготовления пластин для аккумуляторов (около 30% выплавленного свинца), оболочек электрических кабелей, аппаратуры, устойчивой в агрессивных средах и газах, а также для защиты от гамма-излучения (стенки из свинцовых кирпичей).

Для легирования свинцовых баббитов используют Ni, Cd и As. Свинцовый баббит Б16 системы Pb—Sb (15...17%) с добавкой олова (15...17%) и меди (1,5...2%) является дешевым заменителем оловянных баббитов. Он используется для изготовления подшипников скольжения высокоскоростных двигателей, хорошо воспринимает ударные и знакопеременные нагрузки.

Кальциевые баббиты базируются на системе Ca—Pb—Na.

Кальций (Ca) — химический элемент II группы периодической системы элементов, атомный номер 20, атомная масса 40,08, относится к щелочно-земельным металлам. Серебристо-белый легкий металл, плотность 1540 кг/м^3 , $t_{\text{пл}} = 851^\circ\text{C}$. Химически очень активен; при обычной температуре легко окисляется на воздухе. Как активный восстановитель служит для получения U, Th, V, Cr, Zn, Be и других металлов и их соединений, для раскисления сталей, бронз и т.д. Входит в состав антифрикционных сплавов. Соединения кальция применяют в строительстве.

Дополнительное легирование осуществляют Sn, Mg и Al. Эти баббиты (БКА, БК2, БК2Ш), имея небольшую прочность ($\sigma_{\text{в}} = 60\text{...}120 \text{ МПа}$, $20\text{...}30 \text{ НВ}$), могут применяться только в подшипниках с прочным стальным (чугунным) или бронзовым корпусом, как, например, на железнодорожном транспорте для подшипников вагонов, коленчатого вала тепловозных двигателей и др. Для автомобильного транспорта их применяют в виде тонкостенных подшипниковых вкладышей, получаемых штамповкой из биметаллической ленты.

Цинковые баббиты (ГОСТ 21437—95) содержат цинк, легированный алюминием, медью или магнием.

Цинк (Zn) — химический элемент II группы периодической системы элементов, атомный номер 30, атомная масса 65,38. Синевато-белый металл; плотность 7130 кг/м^3 , $t_{\text{пл}} = 419,5^\circ\text{C}$. На воздухе покрывается защитной пленкой оксида. Применяют в щелочных аккумуляторах, для покрытия других металлов с целью защиты их от коррозии (*цинкование*) и получения многих сплавов.

Цинковые баббиты обладают высокими антифрикционными свойствами и прочностью ($\sigma_{\text{в}} = 250 \dots 400$ МПа) и могут применяться для узлов трения, температура которых не превышает 100°C , при сравнительно небольших скоростях скольжения (до 8 м/с). Сплавы ЦАМ 10-5 и ЦАМ 9,5-1,5 в литом виде применяют для монометаллических вкладышей, втулок и др., а сплав ЦАМ 10-5 — для изготовления биметаллических изделий со стальным корпусом. Сплав ЦАМ 9,5-1,5 в деформированном виде используют для получения биметаллических полос со сталью и алюминиевыми сплавами.

2.4.5. Припой

Припой — металл или сплав, заполняющий зазор между соединяемыми деталями и предназначенный для соединения деталей пайкой. Температура плавления припоев должна быть ниже температуры плавления материалов паяемых деталей, а в расплавленном состоянии припой должен хорошо смачивать поверхности металлов. Температурные коэффициенты линейного расширения металла и припоя должны быть близки по величине.

Пайка (паяние) — процесс получения неразъемного соединения путем нагрева места пайки и заполнения зазора между соединяемыми деталями расплавленным припоем с его последующей кристаллизацией.

Припои разделяют на *низкотемпературные* ($t_{\text{пл}} < 400^\circ\text{C}$) и *высокотемпературные* ($t_{\text{пл}} > 400^\circ\text{C}$). Основные материалы низкотемпературных припоев (ГОСТ 21930—76) — сплавы олова и свинца. Дополнительное легирование низкотемпературных (мягких) припоев с целью повышения температуры плавления выполняется сурьмой (до 6%) или кадмием.

Обозначение низкотемпературных припоев (например, ПОССу 18-2) расшифровывается так: П — припой, ОС — оловянно-свинцовый, Су — легирован сурьмой, 18 и 2 — соответственно содержание олова и сурьмы в процентах.

Низкотемпературные припои используются для лужения и пайки деталей электрорадиоаппаратуры, приборов, реле, в том числе оцинкованных, в кабельной, электро- и радиоэлектронной промышленности, пайки белой жести, лужения и пайки деталей с закатанными и клепаными швами из латуни и меди, шпатлевки кузовов автомобилей и др.

Высокотемпературные припои выполняют на медно-латунной, медно-никелевой или серебряной (например, ПСр 72, где 72 — содержание серебра, %) основах. Серебряные припои применяют для пайки черных и цветных металлов, кроме сплавов алюминия и магния, а припои на медной основе — для пайки углеродистых и легированных сталей, никеля и его сплавов.

Припои для высокотемпературной пайки обеспечивают более прочные соединения, чем припои для низкотемпературной пайки, так как вследствие высокой температуры нагрева легче происходит взаимная диффузия элементов основного металла и припоя. Переходное электросопротивление таких припоев ниже, чем низкотемпературных припоев.

Для высокотемпературной пайки меди и медных сплавов наиболее эффективен медно-фосфористый припой ПФОЦ7-3-2, обладающий хорошими коррозионными и прочностными свойствами. Для пайки алюминиевых сплавов применяют бессеребряный припой ВПр19. Соединения, выполненные этим припоем, после анодирования имеют окраску, одинаковую с основным материалом, что особенно важно для получения хорошего товарного вида изделий.

Бессеребряные припои по сравнению с серебросодержащими обеспечивают значительно более высокую коррозионную стойкость паяных соединений (при той же прочности), а следовательно, и их надежность.

2.5. Порошковые металлические материалы

Металлические порошковые материалы (металлокерамика) — материалы, изготавливаемые путем прессования металлических порошков в изделия необходимых формы и размеров и последующего спекания сформованных изделий в вакууме или защитной атмосфере при температуре $0,75...0,8 t_{пл}$. Эти материалы могут быть получены на основе большинства применяемых в технике металлов и сплавов.

Спекание — соединение мелкозернистых и порошкообразных материалов в куски при повышенных температурах.

При спекании происходят сложные физико-химические процессы (восстановление поверхностных оксидов, диффузия, рекристаллизация и др.) и образуется однородный твердый раствор (рис. 64). Спекание позволяет получить однородный твердый раствор даже в том случае, если в равновесных условиях при плавлении использованные компоненты практически нерастворимы друг в друге.

В процессе получения металлических порошковых материалов после холодного прессования материалы, а также заготовки и детали из них обладают невысокой прочностью. Спекание снимает остаточные напряжения и изменяет физические свойства, улучшая механические. Однако увеличение температуры и продолжительности спекания приводит к росту зерен, что может снизить механические свойства изделия.

Порошковые металлические материалы делят на *компактные* и *пористые*. Пористыми называют материалы, в которых после окончательной обработки сохраняется 10...30% остаточной пористости.

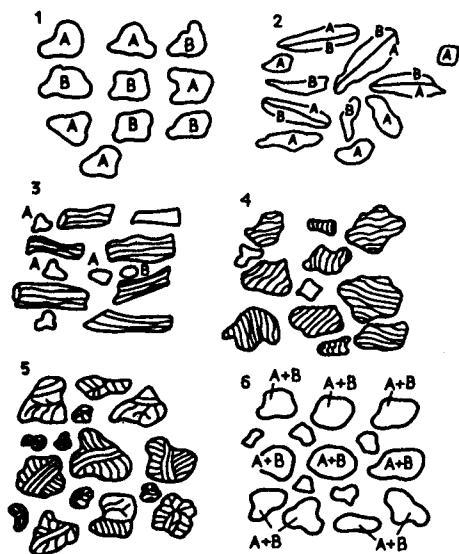


Рис. 64. Стадии получения металлических порошковых материалов:

1 — начало перемешивания элементов А и В; 2 — начальная стадия деформирования; 3 — период преимущественного спекания; 4 — образование равноосных частиц; 5 — произвольная ориентация частиц при спекании; 6 — достижение устойчивого равновесия

Механические свойства изделий из металлических порошков во многих случаях не уступают свойствам изделий, полученных обычными металлургическими методами, но сильно зависят от пористости и содержания кислорода. Увеличение пористости и содержания кислорода заметно снижает ударную вязкость и прочность изделий. Для высоконагруженных

деталей порошковые стали, например, не применяются. Пористые материалы главным образом используются для изготовления фильтров и как антифрикционные материалы.

Металлические порошковые материалы, как и металлы, подвергают химико-термической обработке (азотированию, хромированию, цианированию и др.), но процессы в этом случае протекают более активно ввиду наличия пористости и, следовательно, более развитой поверхности.

К достоинствам металлических порошковых материалов относят увеличение коэффициента использования металла, повышение производительности, возможность получить сплавы с особыми физическими свойствами (литьем нельзя получить, обеспечив необходимый химический состав). Недостатком металлических порошковых материалов является то, что при существующей технологии изделия из них должны быть простой симметричной формы, иметь небольшую массу и размеры. Конструктивные формы детали не должны содержать отверстий под углом к оси заготовки, выемок, внутренних полостей и выступов. Конструкция и форма детали должны обеспечивать возможности равномерного заполнения полости пресс-формы порошками, их уплотнения, распределения напряжений и температуры при прессовании и удаления изделий из пресс-формы.

Металлические порошковые материалы по назначению классифицируют на *конструкционные, инструментальные (твердые сплавы) сплавы и сплавы специального назначения с особыми свойствами.*

2.5.1. Конструкционные металлические порошковые материалы

Конструкционные металлические порошковые материалы по назначению классифицируются на:

- *антифрикционные*;
- *фрикционные*;
- *жаро- и высокопрочные*;
- *фильтрующие* (фильтры, фазоразделители, распределители газовых и жидкостных потоков, глушители звуковых и механических колебаний, огнепреградители и др.);
- *капиллярно-пористые* (испарители, конденсаторы, капиллярные структуры тепловых труб, капиллярные насосы и др.);
- *со специальными свойствами* (пористые аноды, пластины аккумуляторных батарей, заменители костной ткани, катализаторы, каталитично-диффузионные мембраны и др.).

Антифрикционные металлические порошковые материалы имеют низкий коэффициент трения, легко прирабатываются, выдерживают значительные нагрузки и обладают хорошей износостойкостью. Подшипники из порошковых сплавов могут работать без принудительного смазывания за счет выпотевания масла, находящегося в порах. К антифрикционным металлическим порошковым материалам относятся железографит и бронзографит.

Железографит — пористый металлический порошковый антифрикционный материал, состоящий из железа (95...98%) и графита (2...5%); поры железогрaфита заполнены маслом.

Структура железогрaфитов должна быть перлитной с массовой долей связанного углерода около 1%. Такая структура допускает наиболее высокие скорости и нагрузки при наименьшем износе подшипников. Добавка к железогрaфитовым материалам серы (0,8...1%) или сульфидов (3,5...4%), образующих сульфидные пленки на трущихся поверхностях, уменьшает износ и прихватываемость сопряженных деталей, улучшает прирабатываемость.

Основные потребительские свойства железогрaфита: $\sigma_b = 180...300$ МПа, HB 60...120; $k_{тр} = 0,07...0,09$ (со смазкой); $t_3 = 100...200^\circ\text{C}$.

Железографиты (например, ЖГр1, ЖГр3, ЖГр7, содержащие 1...7% графита) используются для изготовления подшипников и втулок для различных узлов машин и механизмов.

Бронзографит — пористый металлический порошковый материал, содержащий частицы графита (1,5...3%), равномерно распределенные между частицами бронзы (до 9% Sn); поры бронзографита заполнены маслом.

По микроструктуре бронзографит представляет собой зерна твердого раствора олова в меди с включениями графита и порами, заполненными смазкой.

Основные потребительские свойства бронзографита: $\sigma_b = 30...50$ МПа; НВ 25...50; $k_{тр} = 0,05...0,007$ (со смазкой); $t_g = 200...250^\circ\text{C}$.

Бронзографиты (например, БрОГр10-2, БрОГр8-4) в основном используются для изготовления втулок для подшипников скольжения.

Наиболее существенной при эксплуатации изделий из антифрикционных порошковых сплавов является допустимая нагрузка. Так, для железографитов она допускается до 1000...1500 МПа, а для бронзографитов — в пределах 400...500 МПа.

Фрикционные металлические порошковые материалы по химическому составу принадлежат системе Fe — Cu. При этом основным компонентом может быть как железо, так и медь. Указанные материалы имеют повышенную хрупкость и низкую прочность. Для упрочнения *фрикционные материалы* изготавливают в виде тонких секторов (сегментов, полос) и крепят на стальной основе.

Фрикционные материалы — материалы, имеющие большой коэффициент трения и высокое сопротивление износу. Используются в тормозных устройствах.

Более высокими потребительскими свойствами обладают материалы на железной основе с добавлением кроме меди различных легирующих компонентов — карбидов кремния, бора, тугоплавких оксидов и др.

Фрикционные металлические порошковые материалы на железной основе используются для изготовления деталей тормозов, тормозных накладок и др., эксплуатирующихся без смазочного материала. Наибольшее применение получил материал ФМК-11 (15% Cu, 9% графита, 3% асбеста, 3% SiO_2 и 6% барита). На медной основе такие материалы применяются для изготовления сегментов и дисков сцепления при жидкостном трении в паре с закаленными стальными деталями и обладают следующими потребительскими свойствами: нагрузка — до 400 МПа; скорость скольжения — до 40 м/с; $t_g = 300...350^\circ\text{C}$.

Жаропрочные и высокопрочные металлические порошковые материалы изготавливают на основе никеля, алюминия, титана, хрома, а также карбидов вольфрама, молибдена, циркония и других тугоплавких металлов. Эти материалы применяются для изготовления таких деталей, химический состав которых нельзя получить литьем.

Фильтры из металлических порошковых материалов изготавливают на основе никеля, железа, титана, алюминия, а также коррозионно-стойких сталей, бронз и т.д. Основными потребительскими свойствами этих материалов являются пористость ($p = 45...50\%$) и максимальный диаметр канала фильтрации ($d_k = 2...20$ мкм). По сравнению с существующими проницаемыми материалами на органической (войлок, бумага, ткань, полимер) и неорганической (керамика, асбест, стекло) ос-

новах фильтры из металлических порошковых материалов характеризуются большими проницаемостью, прочностью, пластичностью, устойчивостью к тепловым ударам, способностью к регенерации. Они коррозионностойки и жаропрочны, могут работать при температурах более 1000°C.

2.5.2. Инструментальные металлические порошковые материалы

Инструментальные металлические порошковые материалы — твердые сплавы, изготавливаемые из порошков прессованием и спеканием. Их можно разделить на две группы по содержанию вольфрама и области применения: *вольфрамовую* и *безвольфрамовую*.

Материалы вольфрамовой группы изготавливают на основе карбидов вольфрама, титана и др. с кобальтовой связкой. Структура материалов этой группы: твердые частицы карбидов вольфрама и титана (у некоторых сплавов, кроме того, карбидов тантала), связанные мягкой эвтектикой. С увеличением содержания кобальта снижаются твердость и износостойкость, но возрастает прочность.

По природе карбидных частиц материалы вольфрамовой группы подразделяются (ГОСТ 3882—74) на вольфрамовые (BK3, BK6, BK8, BK10), титановольфрамовые (Т30К4, Т15К6, Т14К8, Т5К10, Т5К12), титанотанталовольфрамовые (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ10К8-Б, ТТ20К9).

Потребительские свойства инструментальных металлических порошковых материалов вольфрамовой группы по твердости (HRA 73...75), величине модуля Юнга ($E = 500\,000$ МПа) и температуре эксплуатации ($t_3 = 620...720^\circ\text{C}$) превосходят аналогичные показатели быстрорежущих сталей, однако уступают им по показателям прочности ($\sigma_b = 900...1000$ МПа, $\sigma_{изг} = 1400...1650$ МПа).

В марках таких материалов первые буквы обозначают группу, к которой относится сплав (BK — вольфрамовая, Т — титановольфрамовая, ТТ — титанотанталовольфрамовая); цифры в вольфрамовой группе — количество кобальта; первые цифры в титановольфрамовой группе — количество карбида титана, а вторые — количество кобальта; первые цифры в титанотанталовольфрамовой группе — количество карбидов титана и тантала, а вторые — количество кобальта. В марках после дефиса может быть указана крупность порошков: OM — особо мелкие порошки; M — мелкие порошки; B — крупнозернистый карбид вольфрама; BK — особо крупный карбид вольфрама.

Инструменты из металлических порошковых материалов используются для чистовой и черновой обработки труднообрабатываемых материалов, бурения скальных пород и т.д. с собственными показателями HRC 65...69. Получаемая чистота обрабатываемой поверхности из-за высокой жесткости порошковых материалов лучше, чем после резания инструментами из быстро-

режущих сталей. Стойкость режущего инструмента из порошковых сталей по сравнению со стойкостью инструмента из аналогичных литых сталей в 1,2—2 раза выше.

Инструментальные металлические порошковые материалы второй группы (безвольфрамовые) изготавливают на основе карбида титана TiC (сплав ТН-20) или карбонитрида титана Ti(NC) (сплав КНТ-16) с Ni и Mo. Никель и молибден образуют связывающую матрицу. Из безвольфрамовых материалов, обладающих более низкими, чем вольфрамовые материалы, потребительскими свойствами, изготавливаются инструменты для обработки сталей цветных металлов, а также бурения менее прочных горных пород.

Технологическим недостатком инструментальных металлических порошковых материалов является невозможность обработки их резанием, так как они не поддаются термической обработке и не изменяют своей твердости. Таким образом, изделия из твердых сплавов с учетом технологии их изготовления делают только простой формы (короткие сверла) или в виде пластин-накладок, закрепляемых в режущем инструменте или штампе. На рабочие поверхности многогранных неперетачиваемых пластин (МНП) нередко наносят тонкие износостойкие карбидные (TiC) или нитридные (TiN) покрытия, повышающие срок службы инструмента в 3—4 раза.

2.5.3. Порошковые металлические материалы специального назначения с особыми свойствами

Среди металлических порошковых материалов специального назначения с особыми свойствами наиболее широкое распространение получили материалы следующих направлений использования: *с высокими механическими и технологическими свойствами и релаксационной стойкостью, с низким коэффициентом линейного расширения и малой теплопроводностью, магнитные, а также с повышенной коррозионной и электрокоррозионной стойкостью.*

Металлические порошковые материалы с высокими механическими и технологическими свойствами, а также обладающие релаксационной стойкостью изготавливают на основе системы из алюминия, цинка, магния и меди. Так, для деталей оптико-механических и других приборов применяют ПВ90, ПВ90Т1 и др. Эти сплавы имеют высокие механические свойства, хорошую обрабатываемость резанием и высокую релаксационную стойкость. Изделия из этих сплавов подвергают термической обработке.

Металлические порошковые материалы с низким коэффициентом линейного расширения и малой теплопроводностью делаются на базе алюминия с добавками кремния, никеля и других металлов. Их основ-

ное назначение — детали приборов, работающие в паре со сталью. Спеченные алюминиевые сплавы (САС) применяют в тех случаях, когда трудно получить сплав необходимого состава и свойств путем литья и обработки давлением. Из САС1 (25...30% Si, 5...7% Ni, остальное — Al) делают детали приборов, работающие в паре со сталью при температурах 20...200°C, которые требуют сочетания низкого коэффициента линейного расширения и малой теплопроводности.

Металлические порошковые магнитные материалы по составу и свойствам делят на *ферриты и магнитодиэлектрики*.

Ферриты — искусственные материалы, получаемые спеканием в особых условиях при 1100...1300°C мелких порошков оксидов железа Fe_2O_3 и других металлов (MnO, MgO, ZnO, NiO и др.). Название феррита определяется названием двухвалентного металла (Me), оксид которого входит в состав феррита. Так, если в состав феррита входит оксид цинка, то феррит называется цинковым (ZnFe_2O_4), если оксид марганца (MnFe_2O_4) — марганцевый или феррит марганца.

Структура ферритов поликристаллическая и может быть однофазной (α -твердый раствор) и многофазной. Плотность ферритов 3000...5000 кг/м³. Чем выше плотность, тем выше магнитные характеристики.

Большинство ферритов являются ферромагнетиками и сочетают ферромагнитные и полупроводниковые или диэлектрические свойства. Температура точки Кюри у ферритов 450...550°C. Они являются магнитными полупроводниками, удельное сопротивление которых — $10...10^7$ Ом·м. Это позволяет применять ферриты в магнитных полях высокой частоты, так как потери у них незначительны. Некоторые ферриты обладают резко выраженной прямоугольной гистерезисной петлей, что позволяет использовать их в элементах логической автоматики.

Ферриты, как и металлические литые магнитные материалы, делятся на *магнитно-мягкие* и *магнитно-твердые*. К первым относятся ферриты: никель-цинковые, марганцово-цинковые, литий-цинковые, магниевомарганцевые и некоторые другие. У никель-цинковых ферритов удельное электрическое сопротивление $\rho_0 = 10^6...10^8$ Ом·м; плотность 3800...5000 кг/см³; коэффициент линейного расширения 10^5 1/°C; теплоемкость — около 0,17 кал/г·град; теплопроводность — 4,17 Вт/м·град.

Магнитно-твердые ферриты с высокой коэрцитивной силой изготавливают на основе системы из железа, никеля и алюминия (типа *аллико*). Постоянные магниты, изготовленные из таких материалов, обладают свойствами, превышающими аналогичные для материалов при том же химическом составе, полученных литьем из расплавов. Порошковые постоянные магниты для улучшения свойств подвергают дополнительной термической обработке — закалке, закалке с отпуском и др. Прочность таких магнитов в 3—5 раз выше, чем литых.

К магнитно-твердым ферритам относятся феррит бария $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$; феррит кобальта $\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и феррит стронция $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$. У магнитно-твердых ферритов плотность составляет 3300...5000 кг/м³, удельное электрическое сопротивление $10^2 \dots 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Ферриты нашли широкое применение в радиотехнике — ферритовые антенны, сердечники радиочастотных контуров; в СВЧ-технике — вентили и циркуляторы, использующие принцип невзаимного распространения электромагнитной волны в волноводе, заполненном ферродиелектриком; вычислительной технике — элементы оперативной памяти; магнитофонах и видеоманитофонах — покрытие пленок и дисков. Ферриты применяют также для изготовления небольших постоянных магнитов. Ферриты обрабатывают только абразивным инструментом.

Магнитодиелектрики представляют собой композиции магнитных и изоляционных материалов. Изоляционные материалы разделяют металлические частицы в магнитном и электрическом отношении и являются механической связкой. В качестве изоляционных материалов применяют фенольные смолы, полихлорвинил, силикаты, каучук и т.д. Содержание изоляционного компонента в магнитодиелектриках составляет 5...15%.

Порошковые металлические материалы с высокой коррозионной и электрокоррозионной стойкостью могут быть разделены на две группы по направлению использования. Материалы первой группы изготавливаются на основе вольфрама и молибдена с медью (МВ20, МВ40, МВ60, МВ80), серебром (СМ30, СМ60, СМ80, СВ30, СВ50, СВ85 и др.) или с оксидом кадмия (ОК8, ОК12, ОК15 и др.) и применяются для контактов в различных приборах и устройствах. Такие контакты отличаются высокой прочностью, электропроводностью и электрокоррозионной стойкостью. Материалы второй группы получают на основе меди или серебра с графитом (углем) и используются для изготовления токосъемников.

В приборостроении, электротехнической промышленности и электронной технике нашли широкое применение металлические порошковые материалы на основе цветных металлов (АЛП-2, АЛПД-2-4, АЛПЖ12-4, БрПБ-2, БрПЩ10-2, БрПО10Ц3-3, ЛП58Г2-2 и др.). Эти материалы обладают высокой тепло- и электропроводностью, коррозионной стойкостью, немагнитны, хорошо обрабатываются резанием и давлением.

2.6. Композиционные материалы с металлической матрицей

Композиционные материалы с металлической матрицей (металлокомпозиты) — материалы, состоящие из металлической (чаще Al, Mg, Ni и их сплавы) матрицы, упрочненной высокопрочными волокнами (волокнистые материалы) или тугоплавкими тонкодисперсными частицами, не растворяющимися в металле матрицы (дисперсно-упрочнен-

ные материалы). Эти материалы отличаются от обычных сплавов большими значениями временного сопротивления и предела выносливости (на 50...100%), модуля упругости, коэффициента жесткости (E/ρ) и пониженной склонностью к трещинообразованию и высокой жаропрочностью.

Металлические матрицы обладают высокими реакционной способностью в жидкофазном состоянии и сопротивлением деформированию в твердофазном, что создает проблемы химической и механической совместимости.

Применение композиционных материалов с металлической матрицей повышает жесткость конструкции при одновременном снижении ее металлоемкости. Технология получения полуфабрикатов и изделий из таких материалов достаточно хорошо отработана.

Композиционные материалы с металлической матрицей как конструкционные материалы используются практически во всех отраслях народного хозяйства: в авиации — для изготовления высоконагруженных деталей (обшивки лонжеронов, панелей и др.) и двигателей (лопаток компрессоров и турбин и др.) самолетов; в автомобилестроении — для облегчения кузовов, рессор, рам, панелей кузовов, бамперов и т.д., в горной промышленности (буровой инструмент, детали комбайнов и др.), в промышленном и гражданском строительстве (пролеты мостов, элементы сборных конструкций высотных сооружений и др.) и т.д.

2.6.1. Композиционные дисперсно-упрочненные материалы с металлической матрицей

В композиционных дисперсно-упрочненных материалах с металлической матрицей последняя является основным элементом, несущим нагрузку, и эффект упрочнения достигается за счет торможения движения дислокаций в ней дисперсными частицами упрочняющей фазы. Прочность при этом не подчиняется закону аддитивности в зависимости от объемного содержания упрочняющих фаз.

Высокая прочность достигается при размере частиц упрочняющей фазы 10...500 нм, среднем расстоянии между ними 100...500 нм и равномерном распределении их в матрице. Оптимальное содержание частиц для обеспечения прочности и жаропрочности в различных дисперсно-упрочненных материалах неодинаково, но обычно не превышает 5...10 об. %.

Дисперсно-упрочненные металлокомпозиаты могут быть получены на основе большинства применяемых в технике металлов и сплавов. Наиболее широко используют сплавы на основе алюминия — САП (спеченный алюминиевый порошок). В спеченном сплаве алюминий является матрицей ячеистого строения, в которую в качестве фазы-упрочнителя

включены дисперсные частицы Al_2O_3 . Дисперсные частицы не взаимодействуют с матрицей и не коагулируют при нагреве, вследствие чего прочностные свойства САП мало изменяются при нагреве (прочность при 20°C ниже, чем у дуралюминов, а при 200...300°C — выше).

Содержание Al_2O_3 в САП колеблется от 6...9 до 13...22%. С увеличением содержания Al_2O_3 предел прочности повышается от 300 до 400 МПа, а относительное удлинение, соответственно, снижается от 8 до 3%. Оптимальное количество Al_2O_3 составляет 20...22%.

Плотность САП равна плотности алюминия. По длительной прочности они превосходят деформируемые алюминиевые сплавы. Так, длительная прочность для сплавов САП-1 и САП-2 при 500°C составляет 45...55 МПа. Пластичность этих сплавов удовлетворительная, что объясняется влиянием матрицы. САП не уступают алюминию по коррозионной стойкости и даже могут заменять титан и коррозионно-стойкие стали при температурах эксплуатации 250...500°C.

Сплавы САП после спекания прокатывают в листы, прутки разного профиля или подвергают штамповке. Они используются в качестве жаропрочных для работы при температурах на 30...50°C выше, чем у деформируемых и литейных алюминиевых сплавов.

Большие перспективы имеют никелевые дисперсионно-упрочненные металлокомпозиты.

Наибольшей жаропрочностью обладают сплавы на основе никеля с 2...3 об.% диоксида тория (ВДУ-1) или диоксида гафния (ВДУ-2). Матрица этих сплавов — обычно γ -твердый раствор Ni + 20% Cr, Ni + 15% Mo, Ni + 20% Cr и Mo. Наибольшее применение получили сплавы ВДУ-1, ВДУ-2 и ВДУ-3 (матрица Ni + 20% Cr, упрочненная оксидом тория). Эти сплавы обладают высокой жаропрочностью. Так, сплав ВДУ-1 при температуре 1200°C имеет $\sigma_{100} = 75$ МПа и $\sigma_{1000} = 65$ МПа.

Использование в качестве упрочняющих частиц стабильных тугоплавких соединений (оксидов тория, гафния, иттрия, сложные соединения оксидов и редкоземельных металлов), не растворяющихся в матричном металле, позволяет сохранить высокую прочность материала до 0,9...0,95 $T_{пл}$.

2.6.2. Композиционные материалы с металлической матрицей и волокнистым упрочнителем

Металлокомпозиты с волокнистым упрочнителем, в отличие от армированных пластиков, имеют ряд особенностей: хорошую электро- и теплопроводность, влагостойкость, широкий диапазон рабочих температур, повышенную жесткость и прочность однонаправленных материалов в поперечном направлении и при сдвиге, своеобразие механизмов разрушения, а также особенности их деформирования при термомеханических воздействиях и др.

В металлокомпозитах с волокнистым упрочнителем матрица должна полностью окружать все волокна для предотвращения контакта между ними. Это достигается при количестве матрицы не менее 15...20%. Матрица и волокна не должны между собой взаимодействовать, так как это может привести к понижению прочности материала.

Металлические волокна используют в тех случаях, когда требуются высокие тепло- и электропроводимость. При этом сравнительно дешевое армирование осуществляют стальной проволокой.

Для упрочнения алюминия, магния и их сплавов применяют борные ($\sigma_b = 2500...3500$ МПа, $E = 38...420$ ГПа) и углеродные ($\sigma_b = 1400...3500$ МПа, $E = 160...450$ ГПа) волокна, а также волокна из тугоплавких соединений (карбидов, нитридов, боридов и оксидов), имеющих высокие прочность и модуль упругости. Так, волокна карбида кремния диаметром 100 мкм имеют $\sigma_b = 2500...3500$ МПа, $E = 450$ ГПа. Нередко в качестве волокон используют проволоку из высокопрочных сталей. Для армирования титана и его сплавов применяют молибденовую проволоку, волокна сапфира, карбида кремния и борида титана. Для никелевых сплавов повышение жаропрочности достигается армированием их вольфрамовой или молибденовой проволокой.

В алюминиевых, магниевых и титановых сплавах жаропрочность обеспечивается их армированием тугоплавкими непрерывными волокнами бора, карбида кремния, диборида титана и оксида алюминия. Особенностью таких волокнистых материалов является малая скорость разупрочнения во времени с повышением температуры.

Перспективными упрочнителями для волокнистых высокопрочных и высокомодульных композиционных материалов являются нитевидные кристаллы из оксида и нитрида алюминия, карбида и нитрида кремния, карбида бора и др., имеющие $\sigma_b = 15000...28000$ МПа и $E = 400...600$ ГПа.

Основным недостатком композиционных материалов с одно- и двумерным армированием является низкое сопротивление межслойному сдвигу и поперечному обрыву. В волокнистых одноосных композиционных материалах резко проявляется анизотропия физических свойств. Этому недостатка лишены материалы с объемным армированием.

2.7. Металлические стекла

Металлические стекла (аморфные сплавы, стекловидные металлы, метглассы) — металлические сплавы в стеклообразном состоянии, образующиеся при сверхбыстром охлаждении металлического расплава, когда быстрым охлаждением предотвращена кристаллизация (скорость охлаждения менее 10^6 К/с).

Сверхбыстрое охлаждение обеспечивает переохлаждение расплава, и расплав из-за сильного увеличения вязкости по достижении температуры стеклования T_g становится твердым аморфным телом. Вместе с тем температура стеклования T_g не является точкой фазового превращения: расплав и полученное из него стекло принадлежат одной и той же фазе. Металлическое стекло — это как бы замороженная жидкость (в металлическом стекле, как и в расплаве, отсутствует дальний порядок в расположении атомов).

Металлические стекла — метастабильные системы, которые кристаллизуются при нагревании до температуры, равной примерно $1/2 t_{пл}$. Нагрев, когда подвижность атомов возрастает, постепенно приводит аморфный сплав через ряд метастабильных состояний в стабильное кристаллическое состояние. Многие металлические стекла испытывают структурную релаксацию уже при температуре чуть выше комнатной. Наложение деформирующего напряжения усиливает диффузионную подвижность и связанную с ней структурную перестройку сплавов.

На склонность металлических сплавов к стеклообразованию влияют следующие факторы:

- 1) физико-химические свойства компонентов (размерное соотношение, различие в валентности и электропроводности, положение в периодической системе элементов);
- 2) особенности образующихся фаз;
- 3) характеристики диаграмм состояния (например, низкие температуры ликвидуса).

Состав металлических стекол чаще всего выражается формулой $M_{80}X_{20}$, где M — переходные (Cr, Mn, Fe, Co, Ni и др.) или благородные металлы, а X — поливалентные неметаллы (B, C, N, Si, P, Ge и др.), являющиеся стеклообразующими элементами.

Металлические стекла отличаются от кристаллических сплавов отсутствием таких дефектов структуры, как вакансии, дислокации, границы зерен, и уникальной химической однородностью: отсутствует ликвация, весь сплав однофазен.

Особенности строения металлических стекол обуславливают отсутствие характерной для кристаллов анизотропии свойств, высокую прочность, коррозионную стойкость и магнитную проницаемость, малые потери на перемагничивание.

Физико-химические свойства металлических стекол значительно отличаются от свойств литых сплавов. Характерной особенностью потребительских свойств металлических стекол является высокая прочность (для $Fe_{80}B_{20}$ $\sigma_B = 3600$ МПа) в сочетании с большой пластичностью ($E/\sigma_T = 50$ — значение, близкое к теоретически максимально возможному значению) и высокой коррозионной стойкостью. Некоторые металлические стекла — ферромагнетики с очень низкой коэрцитивной силой

и высокой магнитной проницаемостью (например, $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$), а для других характерно очень слабое поглощение звука (сплавы редкоземельных металлов с переходными металлами). Наиболее широкое применение металлические стекла нашли из-за магнитных и коррозионных свойств.

На магнитные свойства металлических стекол благоприятно влияет отсутствие кристаллографической анизотропии и протяженных дефектов. Кроме того, в аморфных сплавах в большей степени, чем в сплавах с кристаллическим строением, проявляются эффекты *магнитного последствия*, что связано со стабилизацией границ доменов вследствие композиционного направленного упорядочения. Для магнитного последствия характерна обратимость магнитных свойств по отношению к магнитному и термическому воздействиям.

Магнитно-мягкие металлические стекла изготавливают на основе Fe, Co, Ni с добавками 15...20% аморфообразующих элементов B, C, Si, P. Например, $\text{Fe}_{81}\text{Si}_3,5\text{B}_{13},5\text{C}_2$ имеет высокое значение магнитной индукции (1,6...1,61 Тл) и низкое — коэрцитивной силы (32...35 мА/см). Аморфный сплав $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4(\text{Mo}, \text{Si}, \text{B})_{30}$ имеет сравнительно небольшое значение магнитной индукции (0,55 Тл), но высокие механические свойства (900...1000 НВ).

Магнитно-мягкие металлические стекла подвергают термомагнитной обработке (нагрев ниже температуры кристаллизации с выдержкой в магнитном поле). Термомагнитная обработка может изменить тип петли гистерезиса и оказывает сильное влияние на магнитные характеристики.

Магнитно-мягкие металлические стекла применяют в электротехнической и электронной промышленности (магнитопроводы трансформаторов, сердечников, усилителей, дроссельных фильтров и др.). Сплавы с высоким сопротивлением износу используются в производстве магнитных экранов и магнитных головок.

Высоким сопротивлением коррозии обладают только стабильные аморфные сплавы. Так, для изготовления коррозионноустойчивых деталей используют металлические стекла на основе железа и никеля, содержащие не менее 3...5% хрома и некоторые другие элементы. Критическая концентрация хрома, обеспечивающая стабильность аморфного сплава, определяется соотношением между легирующими элементами сплава и активностью коррозионной среды. Сопротивление металлических стекол коррозии снижают процессы, усиливающие химическую неоднородность, а именно:

- появление флуктуаций химического состава;
- разделение исходной аморфной фазы на две другие аморфные фазы или фазы с другим химическим составом;
- переход аморфной фазы в двух- или многофазную смесь кристаллов разного химического состава;

- образование кристаллической фазы того же химического состава, что и окружающая матрица.

Технология получения металлических стекол (примеры): закалка из расплава на поверхность быстро вращающегося диска; расплющивание капли расплава между охлаждаемыми наковальнями и др. Эти технологии определяют форму изделий из металлических стекол: лента, проволока, гранулы, порошки. Главный фактор, ограничивающий области применения металлических стекол, — малая толщина литого полуфабриката, который удается получить в полностью аморфном состоянии.

2.8. Защита металлов от коррозии

Коррозия металлов происходит вследствие их взаимодействия с химически активными веществами, содержащимися в природных и технологических средах. В результате коррозии ежегодно теряется около 10% общего количества выплавляемых черных металлов. Коррозия металлов может быть уменьшена или практически устранена нанесением защитных покрытий (например, лакокрасочных), введением в среду ингибиторов (например, хроматов, нитритов, арсенидов), применением коррозионно-стойких материалов (например, сплавов, содержащих металлы с высокой склонностью к пассивированию — хром, никель, молибден и др.).

К числу мероприятий по борьбе с коррозией металла относятся:

- 1) очистка металлов от примесей, ускоряющих коррозионные процессы (удаление серы из железных сплавов);

- 2) легирование элементами, которые переводят металл в пассивное состояние (например, стандартный электродный потенциал углеродистой стали при введении 12,6% хрома изменяется с $-0,6$ до $+1,8$ В, и сталь становится устойчивой к коррозии не только в сухих газовых средах, но и в атмосфере, воде и многих промышленных средах, содержащих кислород и другие окислители);

- 3) нанесение на изделия защитных покрытий.

Защиту от коррозии следует начинать правильным подбором химического состава и структуры металла. Однако наибольшее распространение в практике для защиты металла от коррозии получили легирование и *защитные покрытия*.

Защитные покрытия (пленки) могут быть *металлическими, оксидными, битумными, полимерными, лакокрасочными, стеклоэмалевыми, бетонными* и др.

Металлические покрытия представляют собой механическую (катодное покрытие) или электрохимическую (анодное покрытие) защиту.

Катодное покрытие — это покрытие металлом, который более электроположителен, чем основной (лужение железа оловом). Разрушение основ-

ного металла может произойти только в том случае, если на покрытие образуются трещина или отверстие и пленка уже не будет механически защищать металл.

Анодное покрытие — это покрытие более электроотрицательным металлом, чем основной (например, цинкование и хромирование стали). В случае повреждения электрохимическое растворение металла покрытия препятствует коррозии основного металла.

Процесс нанесения металлических покрытий называется *металлизацией*.

Металлизация — покрытие поверхности изделия слоем металла или сплава для придания ей физических, химических и механических свойств, отличных от свойств металлизированного материала. Применяется для защиты изделий от коррозии, износа, эрозии, повышения контактной электрической проводимости, в декоративных целях. Металлизация позволяет обрабатывать изделия, собранные в конструкции, однако получается шероховатая поверхность.

Оксидные покрытия получают, например, при оксидировании и *фосфатировании*.

Фосфатирование — создание на изделии поверхностной пленки из нерастворимых солей железа или марганца в результате обработки металла фосфатами железа или марганца.

Использование лакокрасочных покрытий основано на механической защите металла пленкой из различных красок и лаков. Лакокрасочные покрытия используют, например, для защиты трубопроводов с наружной и внутренней сторон. Такие покрытия состоят из двух-трех слоев грунтовки и двух слоев эмали.

Битумные покрытия наносят в заводских и полевых условиях на трубы диаметром не более 800 мм и при температуре транспортируемых продуктов не выше 40°C.

Полимерные покрытия получают наклеиванием полимерной пленки, напылением порошкообразного полимера (или другими методами) на поверхность конструкционного материала, например металлопласта. Одним из основных технологических требований к таким покрытиям является требование не расслаиваться при механической обработке.

Металлопласт — конструкционный материал, состоящий из металлического листа (сталь, алюминий, титан и др.), покрытого с одной или двух сторон слоем полимера, например полиэтилена, фторопласта, поливинилхлорида. Применяют для защиты от коррозии и декоративной отделки стен и крыш зданий, в производстве кузовов автомобилей, холодильников и т.д.

Полимерные покрытия, используемые в полевых условиях, представляют собой липкие изоляционные полиэтиленовые и полихлорвиниловые ленты, которые наматываются на трубопровод в один или два

слоя. Полиэтиленовые ленты применяют на трубопроводах, диаметр которых не более 1420 мм и температура транспортируемого продукта не выше 60°C, полихлорвиниловые — при диаметре не более 1020 мм и температуре не выше 35°C. Заводские полимерные покрытия пригодны для труб любого диаметра. Полимерные покрытия защищают рулонными защитными обертками.

Эмалевые покрытия наплавляют на металл, используя различные комбинации силикатов (кварц, полевой шпат, буру, глину и др.). Эмалевые покрытия наносятся также с декоративной целью (ванны, раковины и другие изделия). Наибольшую термостойкость имеют стеклоэмали, получаемые при их наплавлении током высокой частоты. Перед наплавлением грунтовые и покровные эмали в тонко измельченном состоянии наносят на предварительно очищенные и обезжиренные трубы. Однако ввиду хрупкости этот вид покрытия не находит широкого применения.

Бетонные покрытия выполняются в виде сплошного бетонного слоя или железобетонных скорлуп.

При временной защите металлических изделий от коррозии (транспортирование, складирование и другие технологические операции) для покрытия металла используют невысыхающие масла (технический вазелин, лак, этиноль), а также ингибиторы.

МАТЕРИАЛЫ ИЗ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Органическое вещество (органическое соединение) — вещество, представляющее собой комплекс соединений углерода с другими элементами, возникший прямо или косвенно из живого вещества или продуктов его жизнедеятельности.

3.1. Лесоматериалы

3.1.1. Общие сведения

Дерево — многолетнее растение с одревеневшим главным стеблем (стволом), сохраняющимся в течение всей его жизни (от десятков до сотен лет) и ветвями, образующими крону. По структуре поперечного разреза ствола дерева как элементы различают *кору, камбий, сердцевину* и *древесину* (рис. 65).

Кора растения — многослойная периферическая ткань стеблей и корней растений. Развивающаяся кора состоит из наружного слоя — корки и внутреннего — луба. *Луб (флоэма)* — ткань высших растений, которая служит для проведения органических веществ, синтезируемых главным образом в листьях, из кроны дерева вниз и содержит их запасы. Кора может содержать дубящие, лекарственные, пряные и другие вещества.

Камбий — образовательная ткань в стеблях и корнях растений, дающая начало вторичным проводящим тканям и обеспечивающая их рост в толщину: к центру дерева откалываются клетки древесины, а в сторону луба — лубяные клетки. Сезонные изменения активности камбия в результате смены теплого и холодного времен года обуславливают образование годичных колец (слоев прироста древесины). Годичные кольца видны на срезе ствола дерева и позволяют определить его возраст и условия жизни.

Серцевина дерева — центральная часть стебля или корня, занятая рыхлой первичной тканью дерева, в которой откладываются крахмал, масла и дубящие вещества. Она состоит из наиболее тонкостенных клеток и имеет малую прочность. Серцевина легко загнивает. Часть древесины, прилегающая к сердцевине, состоит из омертвевших клеток и называется *ядром*. Движение влаги по этим клеткам прекратилось. Ядро окружено кольцами

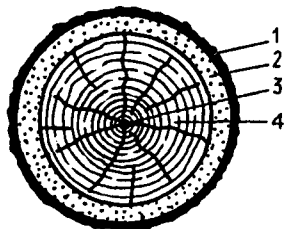


Рис. 65. Схема поперечного разреза ствола дерева:
 1 — кора растения; 2 — камбий; 3 — сердцевина дерева; 4 —
 древесина (ксилема)

более молодой древесины — *заболонью*, по живым клеткам которой, расположенным рядами тонких концентрических колец, перемещается влага с растворенными в ней питательными веществами. Если у древесной породы ядро отсутствует, то ее называют *заболонной* (береза, клен, ольха).

Древесина (ксилема) — ткань высших растений, служащая для проведения воды и растворов минеральных солей от корней к листьям и другим органам.

Микроструктура древесины волокнистая, пористая. Древесина образована из вытянутых веретенообразных клеток-ячеек, стенки которых состоят в основном из *целлюлозы*. Эти пустотелые клетки-ячейки образуют волокна.

Целлюлоза — полисахарид, образованный остатками глюкозы, является природным линейным полимером, нитевидные цепи которого жестко связаны гидроокисными связями. Строение целлюлозы объясняет отсутствие у древесины области высокоэластичного состояния, возникающего при нагревании многих линейных полимеров.

Макроструктуру древесины изучают по трем разрезам ствола дерева: поперечному, радиальному продольному (по диаметру или радиусу) и тангенциальному продольному (по хорде).

При росте дерева, при хранении на складах и эксплуатации появляются так называемые *пороки древесины*.

Пороки древесины — это отклонения от нормального строения, а также повреждения, которые оказывают влияние на ее свойства. В зависимости от причин появления пороки согласно ГОСТ 2140—71 делят на группы, виды и разновидности. Группы пороков могут быть условно разделены по четырем основным причинам появления:

- пороки, зависящие от неправильного роста древесины (*сучки, трещины, пороки формы ствола и строения древесины, химические окраски*);
- повреждения древесины грибами;
- биологические повреждения древесины насекомыми (*червоточина*), паразитными растениями и птицами;
- механические повреждения, инородные включения, пороки обработки и покоробленности.

Применяемые в промышленности породы деревьев можно разделить на две группы:

- 1) *хвойные породы* — сосна, ель, лиственница, пихта, кедр сибирский и др.;
- 2) *лиственные породы* — дуб, ясень, осина, береза, клен, бук и др.

Древесина хвойных деревьев пропитана *смолой*, а древесина лиственных — *дубильными веществами*.

У разных пород деревьев древесина различна по своим физико-химическим свойствам. Свойства древесины принято рассматривать:

- а) в трех направлениях — продольном, радиальном и тангенциальном;
- б) при стандартной влажности — 15% (для промышленного использования разрешается влажность древесины не более 25%);
- в) при стандартных наклоне волокон и количестве пороков (трещин, червоточин, сучков и др.).

Физико-химические свойства древесины являются уникальными и широко используются в промышленности. Рассмотрим некоторые из них на примере сосны.

Физические свойства сосны: плотность — от 490 до 750 кг/м³; пористость — от 46 до 85%; электропроводность — от 10⁴ до 10⁷ Ом·м (электропроводность сырой древесины уменьшается примерно в 10 раз); диэлектрическая проницаемость — от 19 до 33 пФ/м, теплопроводность — от 0,15 до 0,33 Вт/(м·К). Низкая теплопроводность древесины объясняется тем, что дерево имеет много пор, заполненных древесиной.

Механические свойства: прочность на сжатие — 55 МПа, на изгиб — 100 МПа; модуль Юнга — 1 · 10⁻⁴ МПа.

Удельная прочность древесины при растяжении вдоль волокон (σ_b/ρ_0) примерно такая же, как у высокопрочной стали и стеклопластика. Однако ее сильно снижают сучки, трещины и другие пороки.

Особенностью древесины является текучесть, которая ярче всего проявляется во влажных условиях. Древесина не растворяется в воде и органических растворителях.

К основным технологическим свойствам древесины относятся обрабатываемость резанием; сопротивляемость раскалыванию, сжатию, изнашиванию; способность удерживать шурупы, гвозди; возможность скрепления с помощью склеивания, врубок, гвоздей и др.; долговечность. Одно из отрицательных технологических свойств дерева — неравномерное изменение линейных размеров при усушке и набухании.

Недостатками древесины являются ее *возгораемость* и *гниение*.

Температуры воспламенения древесины (соответствующая вспышке горючих газов) 250...300°C. При температурах выше 350°C газы, выделяющиеся из древесины, воспламеняются даже при отсутствии открытого пламени. Для предупреждения возгорания деревянных конструкций следует использовать соответствующие конструктивные меры, а также предохранять от огня поверхность деревянных конструкций красочными огнезащитными составами или пропитывать древесину огнезащитными веществами — *антипиринами*.

Гниение древесины — разложение целлюлозы древесины вследствие деятельности дереворазрушающих грибов и микроорганизмов. Способами предотвращения гниения являются создание условий, не благоприятных для развития дереворазрушающих грибов, и введение в древесину веществ, ядовитых для грибов, — **антисептиков**. Антисептирование деревянных элементов, подвергающихся действию воды (рудничные стойки, столбы, сваи, шпалы и др.), осуществляют нерастворяющимися маслянистыми антисептиками или антисептическими пастами.

Способом воздействия на свойства древесины является **модифицирование**.

Модифицирование — направленное изменение физико-механических, теплофизических, триботехнических, биохимических и других свойств древесины применительно к условиям эксплуатации изделий из нее.

Спиленное и очищенное от сучьев дерево называют **стволом** (или **хлыстом**). После распиловки ствола получают **деловую** и **дровяную части**.

Деловая древесина — части ствола дерева определенных размеров и качества, являющиеся конечным продуктом лесозаготовительного производства или используемые как полуфабрикаты для дальнейшей механической или химической переработки в **лесоматериалы**.

Лесоматериалы — материалы из древесины, сохранившие ее природную структуру и химический состав. Различают **круглые** и **обработанные лесоматериалы**.

3.1.2. Круглые лесоматериалы

Круглые лесоматериалы — отрезки стволов деревьев различной толщины (диаметра) в верхнем отрезе и переменной по длине. Круглые лесоматериалы подразделяют на **бревна**, **подтоварник** и **жерди**.

Бревна — круглые лесоматериалы длиной от 3 до 6,5 м, очищенные от сучьев заподлицо с поверхностью и окоренные с полным удалением луба. Классификация бревен осуществляется **по толщине ствола в верхнем отрезе, по наличию пороков и по длине**.

По толщине ствола в верхнем отрезе бревна подразделяют на три группы:

- мелкие — с толщиной ствола для хвойных бревен 6...13 см, для лиственных — 8...13 см;
- средние — от 14 до 24 см;
- крупные — 26 см и более.

По наличию пороков бревна делятся на три сорта (1, 2 и 3). Сортность определяют путем установления норм пороков древесины (ГОСТ 2140—71). При этом к порокам относят сучки, грибные поражения, червоточину, трещины, кривизну ствола и др.

По длине бревна используют с градацией через 0,5 м.

Подтоварник и жердь — круглые лесоматериалы толщиной в верхнем отрезе, соответственно, 8...11 и 3...7 см.

Назначение для промышленного применения круглых материалов с общими требованиями к ним приведено в табл. 8.

Таблица 8

Назначение и общие требования к круглым лесоматериалам

Назначение лесоматериалов	Порода древесины	Сорт	Толщина, см	Длина, м
Хвойные породы (по ГОСТ 9463—88)				
1. Для свай гидротехнических сооружений и элементов мостов	Сосна, ель, лиственница, пихта европейская и кавказская	2	22...34	6,5; 8,5
2. Для опор линий электропередач напряжением, кВ:				
а) ниже 35	Сосна, ель, лиственница, пихта	1; 2	16...22	4,5; 6,5; 8,5; 9,5; 11,0; 13,0
б) 35 и выше	Сосна, лиственница	1; 2	По особому заказу	
3. Для строительства	Сосна, ель, пихта, лиственница	1; 2	14...24	3,0...6,5
4. Для вспомогательных и временных построек различного назначения (подтоварник)	То же	2	6...13	3,0...6,5
5. Для разделки на рудничную стойку	»	1; 2	7...24	4,0...6,5
Лиственные породы (по ГОСТ 9462—82)				
1. Для выработки шпал железных дорог:				
а) широкой колеи	Береза	2; 3	26 и более	3,0...5,5
б) узкой колеи	То же	2; 3	20 и более	1,5; 1,65, 1,8...3,2; 3,5
2. Для строительства	Все породы	2	12...24	4,0...6,5
3. Для вспомогательных и временных построек различного назначения (подтоварник)	То же	2	8...11	Не менее 3,0
Примечание. В лесоматериалах, предназначенных для разделки на рудничную стойку, не допускаются зарубы, запилы, выколы сучков и другие поверхностные повреждения глубиной более $\frac{1}{20}$ диаметра торца в месте повреждения; наличие двух радиальных трещин, направленных по одному диаметру с двух противоположных сторон боковой поверхности, превышающей в общей сумме по глубине $\frac{1}{2}$ диаметра соответствующего торца.				

Хранить круглые лесоматериалы надо поднятыми от земли минимум на 50 см. Торцы бревен рекомендуется замазать глиной, известью или мелом, чтобы они не растрескивались, а бревна, уложенные в штабели, надо держать под навесом в тени, закрыв со всех сторон. Лесоматериал надо периодически осматривать и обрабатывать антисептиком против грибов и жуков-короедов.

3.1.3. Пиломатериалы

После естественной предварительной сушки круглый лес может быть разделан на *пиломатериалы* (рис. 66).

Пиломатериалы — материалы из древесины, полученные распиловкой бревен вдоль волокон. Различают пиломатериалы радиальной, тангенциальной и смешанной распиловки. Пиломатериалы с опиленными кромками называются *обрезными*, с неопиленными кромками — *необрезными* (рис. 66, з, к). Пиломатериалы, подвергшиеся после распиловки дальнейшей обработке (для сглаживания поверхностей или фасонной профилировки), называются *строганными*.

Пиломатериалы в зависимости от толщины, ширины и формы подразделяют на *доски, брус, брусок и горбыль*.

Доски, получившие наибольшее распространение в строительных работах, бывают толщиной от 16 мм и больше, причем ширина должна быть больше двойной толщины. Доски в свою очередь классифицируются по *способу обработки* и по *толщине*.

По способу обработки доски делятся на *необрезные, полуобрезные и обрезные*.

Необрезные доски получают при распиливании бревна в продольном направлении. Они имеют изменяющуюся по длине доски ширину (один их конец бывает уже). Кромки у таких досок острые. У полуобрезных досок (рис. 66, и) тоже меняется ширина, но только часть кромки остается неопиленной (*обзол*). Происходит это потому, что для полуобрезных досок отпиливают горбыли несколько уже, чем для обрезных досок. Обрезные доски получают, когда бревно предварительно опилено с двух сторон, чтобы при распиловке получались полностью обрезные доски без обзола и одинаковой ширины.

По толщине для досок в практике принята следующая классификация: *тес* (20...30 мм), *двадцатка* (20 мм), *дюймовка* (25 мм), *тридцатка* (30 мм).

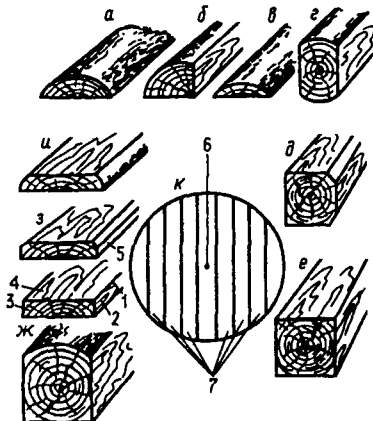
Брус — пиломатериалы толщиной и шириной более 100 мм. Соответственно числу опиленных сторон брусья бывают *двух-, трех- и четырехкантные*.

Брусок — обрезной пиломатериал толщиной до 100 мм и шириной не более двойной толщины.

Горбыль — пиломатериал, получаемый при продольной распиловке путем среза наружной части бревна (с пропилом на всю длину с одной

Рис. 66. Способы разделки круглого леса на пиломатериалы и доски различных видов:

а — пластина; *б* — четвертина; *в* — горбыль; *г* — двухкантный брус; *д* — четырехкантный брус с обзолом; *е* — чистый брус; *ж* — четырехкантный брус; *з* — обрезная доска; *и* — полуобрезная доска с обзолом; *к* — необрезные доски; 1 — кромка; 2 — ребра; 3 — левая, или внутренняя, пласт; 4 — правая, или наружная, пласт; 5 — обзол; 6 — сердцевина доски; 7 — боковые доски



стороны и горбом — с другой). Горбыли могут быть разной толщины и ширины: самый толстый и широкий — с комлевой (прикорневой) части бревна, самый тонкий и узкий — в отрубе.

Горбыль применяют главным образом для вспомогательных сооружений, настилки черновых полов и наката на чердачном перекрытии, крепления горных выработок, устройства заборов, стен сараев и др.

Пиломатериалы хвойных пород в зависимости от допускаемых пороков древесины подразделяют на доски и бруски пяти сортов, а брусья — четырех сортов. Лучшие сорта (отборный и первый) пиломатериалов применяют для деталей обшивки внутренней палубы судов, поперечных балок и бортов грузовых автомобилей, в сельскохозяйственных машинах и др. Пиломатериалы хвойных пород четвертого сорта применяют для мелких заготовок и изготовления тары.

Пиломатериалы из лиственных пород подразделяют на три сорта. В столярном деле используют только 1-й и 2-й сорта, в строительстве — все сорта. Максимально допустимая влажность не должна превышать 25%.

Пиломатериалы, нарезанные по определенным габаритным размерам, называются *заготовками*. Промышленные предприятия поставляют заготовки *цельными* и *клееными*, *пилеными* (черновыми) и *калиброванными* (строганными). Качество древесины и обработка заготовок хвойных пород должны соответствовать ГОСТ 9685—61, а лиственных — ГОСТ 7897—83.

Пиломатериалы по назначению делят на *строительные*, *столярные*, *тарные*, *экспортные* и *специальные*.

3.1.4. Древесные материалы и изделия из них

Древесными материалами являются *шпон*, *древесная шерсть*, *стружка*, *дрань* и *гонт*.

Для производства древесных материалов используются *кряжи* — толстые короткие прикорневые отрезки стволов, а также отходы лесообработки и переработки древесины (горбыль, рейки, стружки, опилки).

Лущеный шпон — тонкая непрерывная стружка, снятая с поверхности бревна, вращающегося вокруг своей оси: толщина — от 0,55 до 1,5 мм; ширина — от 150 до 1900 мм; влажность 6...10%. Лущеный шпон применяется для изготовления клееной фанеры.

Древесная шерсть — стружка коротких бревен ели, пихты или сосны длиной 200...500, шириной — 2...5 и толщиной 0,3...0,5 мм.

Стружка, дрань и гонт — кровельные материалы, изготавливаемые из осины, сосны, ели, пихты.

Стружку производят длиной (вдоль волокна) 40...50 см, шириной 7...12 см и толщиной 0,3 см. **Дрань** (дранка, драница) — тонкие (3...5 мм) деревянные дощечки для обшивки стен и потолка под штукатурку (длина 1,25...2,5 м, ширина 12...30 мм) и для устройства кровли (длина 0,4...1 м, ширина 90...130 мм). **Гонт** — клиновидные дощечки с продольным пазом в толстой кромке (торце). Длина 50...70 см, ширина — около 10 см, толщина 1,5 см. При устройстве кровли узкая кромка одной дощечки вставляется в паз другой.

Древесные изделия — искусственные материалы, получаемые из древесины путем распиливания, измельчения волокон, склеивания и других процессов. Эти изделия изготавливают по наиболее распространенным технологиям в четырех видах:

- **слоистые материалы (фанеры)** — склеивание слоев шпона под действием давления и тепла;
- **древесностружечные плиты** — горячее прессование древесной стружки и клея (чаще карбамидных смол);
- **древесноволокнистые плиты** — склеивание или горячее прессование древесных волокон;
- **облегченные плиты (фибролит)** — прессование длинных стружек и минерального связующего вещества.

Фанера — искусственный древесный материал, получаемый склеиванием из трех и более слоев лущеного шпона. Число слоев в фанере обязательно должно быть нечетным, так как при этом уменьшается коробление изделия. Для производства клееной фанеры используют лущеный шпон трех сортов из древесины дуба, бука, березы, ясеня, ольхи и липы. Фанеру классифицируют по направлению волокон в смежных листах шпона, водостойкости, виду обработки поверхности и числу слоев.

По направлению волокон в смежных листах шпона в промышленности используются следующие величины углов между волокнами: 90, 60, 45 (диагональная) и 30°.

Водостойкость фанеры определяется типом примененного клея. По водостойкости выделяют три группы фанеры:

- **повышенной водостойкости** — фенолоформальдегидный клей;

- *средней водостойкости* — карбамидный или альбумин-казеиновый клей;
- *ограниченной водостойкости* — казеиновый клей.

Водостойкую фанеру (марки ФСФ) применяют для обшивки наружных стен, кровельных работ, изготовления несущих и ограждающих конструкций, а других марок — для устройства внутренних перегородок и обшивки стен и потолков внутри помещений.

По виду обработки поверхности фанера может быть *шлифованная* с одной или двух сторон и *нешлифованная*.

Для декоративных целей фанеру оклеивают строганым шпоном. Строганный шпон изготавливают из тех же пород древесины, что и лущеный, а также из ореха, вяза, каштана, платана, груши, яблони, черешни и других ценных пород.

По числу слоев различают *трех-, пяти- и многослойные фанеры*.

Размеры фанеры определены стандартами: максимальный — 2440×1525 мм; минимальный — 1220×725 мм; толщина — от 1,5 до 12 мм.

Древесностружечные плиты (ГОСТ 10632—89) — искусственный древесный материал, изготавливаемый горячим прессованием специально приготовленных древесных стружек с жидкими термореактивными полимерами (фенолоформальдегидными, карбамидными и др.).

Структурно древесностружечные плиты состоят из трех слоев. Средний слой состоит из относительно толстых стружек толщиной 1 мм, а наружные слои — из тонких стружек толщиной до 0,2 мм. Такой характер структуры плит повышает их прочность.

Древесностружечные плиты выпускают различной плотности, кг/м³: *очень высокой* — 660...800, *средней* — 510...650, *малой* — 360...500 и *очень малой* — 350.

Плиты средней и высокой плотности применяются как конструкционный и отделочный материал, плиты малой плотности — как тепло- и звукоизоляционный материал.

Для придания древесностружечным плитам биостойкости в полимерно-стружечную массу добавляют антисептики (фторид и кремнефторид натрия, бура и др.). В качестве антипиренов используют добавки сульфата аммония и диаммонийфосфат. Для уменьшения набухания плит во влажном воздухе в исходную массу вводят гидрофобизирующие вещества (парафиновую эмульсию, раствор кремнийорганического полимера и др.).

В качестве декоративной отделки, защищающей плиты от увлажнения и истирания, применяют полимерные пленочные материалы, бумагу, пропитанную смолами. Нередко предварительно отшлифованную

поверхность плит покрывают водостойкими фенольными или эпоксидными лаками.

Хранят древесностружечные плиты в закрытых помещениях, исключающих резкие колебания температуры и влажности. Плиты укладывают в штабеля на поддоны.

Древесноволокнистые плиты (ГОСТ 4598—86) — искусственный древесный материал, изготавливаемый путем горячего прессования или сушки волокнистой массы, состоящей из древесных волокон, наполнителей, полимера и добавок (антисептиков, антипиренов, гидрофобизирующих веществ) и сформированной в виде ковра. При изготовлении сверхтвердых плит в смесь вводят фенолоформальдегидный полимер. Горячее прессование при температуре 150...165°C и давлении 1...5 МПа ускоряет твердение связующего, а изменяя давление прессования, можно получить плиты разной плотности и с различными физико-химическими свойствами.

Древесноволокнистые плиты в зависимости от назначения подразделяют на твердые и мягкие типы.

Плиты твердого типа в зависимости от прочности, плотности и вида лицевой обработки подразделяют на марки:

Т — с необлагороженной лицевой поверхностью;

Т-С — с лицевым слоем из тонкодисперсной древесной массы;

Т-П — с подкрашенным лицевым слоем;

Т-СП — с подкрашенным лицевым слоем из тонкодисперсной древесной массы;

Т-В — с необлагороженной лицевой поверхностью повышенной водостойкости; $\rho_0 = 850...1100 \text{ кг/м}^3$ и $\sigma_{\text{изг}} = 40 \text{ МПа}$;

Т-СВ — с лицевым слоем из тонкодисперсной древесной массы повышенной водостойкости;

НТ — пониженной плотности (полутвердые); ρ_0 — не менее 600 кг/м³ и $\sigma_{\text{изг}} > 15 \text{ МПа}$;

СТ — повышенной прочности (сверхтвердые), $\rho_0 = 950...1100 \text{ кг/м}^3$ и $\sigma_{\text{изг}} = 47 \text{ МПа}$;

СТ-С — повышенной прочности (сверхтвердые) с лицевым слоем из тонкодисперсной древесной массы.

Твердые плиты марок Т, Т-С, Т-П, Т-СП в зависимости от уровня физико-механических показателей подразделяют на группы качества: А ($\rho_0 = 850...1100 \text{ кг/м}^3$ и $\sigma_{\text{изг}} = 38 \text{ МПа}$) и Б ($\rho_0 = 800...1100 \text{ кг/м}^3$ и $\sigma_{\text{изг}} = 33 \text{ МПа}$); по качеству поверхности плиты этих марок подразделяют на I и II сорта.

Мягкие плиты в зависимости от плотности подразделяют на марки: М-1 ($\rho_0 = 200...400 \text{ кг/м}^3$ и $\sigma_{\text{изг}} = 1,8 \text{ МПа}$), М-2 ($\rho_0 = 200...350 \text{ кг/м}^3$ и $\sigma_{\text{изг}} = 1,1 \text{ МПа}$) и М-3 ($\rho_0 = 100...200 \text{ кг/м}^3$ и $\sigma_{\text{изг}} = 0,4 \text{ МПа}$).

Древесноволокнистые плиты применяют для тепло- и звукоизоляции ограждающих конструкций. Плиты твердого типа применяют для устройства перегородок, подшивки потолков, настилки полов, для изготовления дверных полотен и встроенной мебели. Отделочные плиты (ГОСТ 8904—81), предназначенные для облицовки стен и потолков, облицовывают синтетической пленкой с прокладкой текстурной бумаги под цвет и текстуру древесины ценных пород или окрашивают водоэмульсионными поливинилацетатными красками.

Содержание вредных химических веществ, выделяемых плитами в производственных помещениях при эксплуатации, не превышает утвержденные предельно допустимые концентрации (ПДК).

Фибролит — искусственный древесный материал, изготавливаемый из древесной шерсти и неорганического вяжущего вещества, чаще всего портландцемента (*цементный фибролит*).

Плотность цементно-фибролитовых плит 250...500 кг/м³. В зависимости от плотности цементный фибролит выпускают трех марок: Ф-300, Ф-400, Ф-500. Прочностные характеристики фибролита зависят от его плотности и толщины изделия (плит). Так, предел прочности при изгибе фибролитовой плиты Ф-400 толщиной 75 мм составляет 0,7 МПа. Модуль упругости при изгибе 300...500 МПа. Теплопроводность цементно-фибролитовых плит 0,08...0,1 Вт/(м·К). Водопоглощение 35...45%. Влажность должна быть не более 20% (по массе). Фибролит относится к биостойким трудногоряемым материалам.

Фибролит марки Ф-300 применяют в качестве теплоизоляционного материала, марок Ф-400 и Ф-500 — конструктивно-теплоизоляционного материала в помещениях с относительной влажностью воздуха не выше 75%. Цементный акустический фибролит марок Ф-400 и Ф-500 в виде плит характеризуется высоким коэффициентом звукопоглощения и предназначен для акустической отделки помещений.

3.2. Бумажные материалы

3.2.1. Общие сведения

Бумажные материалы — это материалы, изготовленные на основе растительных волокон и сохранившие их природную структуру и химический состав. Их классифицируют по виду сырья, толщине и массе 1 м², количеству слоев. По виду сырья различают *древесные* и *растительные бумажные материалы*. По толщине и массе 1 м² бумажные материалы делят на *бумагу* и *картон*. При этом бумагой считают материал, у которого толщина h менее 0,5 мм, а масса 1 м² менее 250 г. По количеству слоев различают *однослойные* и *многослойные бумажные материалы*.

3.2.2. Бумага и изделия на ее основе

Бумага — искусственный материал, состоящий главным образом из специально обработанных растительных (в основном древесных) волокон, тесно переплетенных между собой и соединенных силами сцепления, возникающими между волокнами при их обработке, массой 1 м² менее 250 г.

При изготовлении бумаги обязательно используются различного рода добавки для придания ей необходимых потребительских свойств, а в ряде случаев — из экономических соображений. К наиболее распространенным добавкам относятся, например, мел и каолин.

К основным потребительским свойствам бумаги относятся масса 1 м² (4...250 г), толщина (4...400 10⁻⁶ м), механические свойства, цвет, белизна, гладкость, впитывающая способность, электрические свойства и др.

Бумага классифицируется по ее назначению на виды: *электроизоляционная, кабельная, конденсаторная, фильтровальная, реактивная, светочувствительная, чертежная, оберточная* и др. Известно свыше 600 видов бумаги.

Основные потребительские характеристики кабельной бумаги установлены ГОСТ 23436—83. Так, для КМП-120: плотность — 0,78±0,05 г/см³; толщина — 120±7 мкм; относительное удлинение в машинном направлении — 2,8%, поперечном направлении — 7%; воздухопроницаемость — не более 40 см³/мин; массовая доля золы — не более 0,8%; удельная электрическая проводимость водной вытяжки при модуле 1 : 50 — не более 80 мкСм/см; рН водной вытяжки 7,0...9,0; влажность — не более 8%.

Для кабельной бумаги принята следующая маркировка: К — двухслойная бумага, КМ — многослойная бумага, КМП — многослойная упрочненная бумага. После марки указывается толщина бумаги в мкм.

Кабельная бумага предназначена для изоляции силовых кабелей на напряжение до 35 кВ включительно, телефонных кабелей и обмоточных проводов, а также для изготовления различных электроизоляционных изделий.

Кабельная бумага выпускается в рулонах диаметром 500...800 мм и шириной 500...1000 мм (установлен рекомендуемый ряд размеров по ширине).

Конденсаторная бумага может быть четырех видов: КОН — обычная конденсаторная бумага, СКОН — специальная конденсаторная бумага повышенной надежности, МКОН — конденсаторная бумага с малыми диэлектрическими потерями, ЭМКОН — конденсаторная бумага высокой электрической прочности с малыми диэлектрическими потерями и двух типов: Н — низкой влажности, В — с увеличенной электрической прочностью. Кроме того, для конденсаторной бумаги устанавливают марки, определяющие ее толщину.

Основные потребительские свойства и области применения конденсаторной бумаги установлены ГОСТ 1908—88. Так, конденсаторная бумага вида ЭМКОН типа В имеет следующие основные потребительские свойства: толщина 10...30 мкм; среднее пробивное напряжение в один слой при переменном напряжении частотой 50 Гц — 500...1500 В, не менее; количество токопроводящих включений на 1 м² — не более 30...7; тангенс угла диэлектрических потерь при 120°С в сухом виде — 0,15%, не более, при пропитке трихлордифенилом в секциях конденсаторов — 0,27%, в электродах — не более 0,4%; индекс прочности при растяжении в машинном направлении — не менее 12,3...36,3 Н·м/г; удельная электрическая проводимость водной вытяжки при модуле 1:50 — не более 15 мкСм/см; рН водной вытяжки — 6,0...7,5; влажность — не более 8%.

Конденсаторная бумага применяется в качестве диэлектрика для электрических конденсаторов. Ее изготавливают в бобинах или рулонах диаметром 180...220 мм и шириной 12...800 мм (установлен рекомендуемый ряд размеров по ширине).

Условное обозначение конденсаторной бумаги должно содержать данные о виде, типе, марке, толщине бумаги, ширине бобины или рулона и обозначение принятого стандарта.

Фильтровальная бумага — непроклеенная бумага из хлопчатобумажного волокна, содержащая не более 0,8% золы. Служит для фильтрования.

Реактивные бумаги — фильтровальные бумаги, пропитанные растворами реагентов, изменяющими цвет при взаимодействии с определенными веществами. Применяются для ориентировочного определения водородного показателя рН растворов, быстрого обнаружения некоторых элементов и соединений.

Пергамент — прозрачная жиронепроницаемая влагостойкая бумага, получаемая обработкой непроклеенной бумаги серной кислотой с последующей щелочной нейтрализацией. Применяют для упаковки и в технических целях.

Обои — рулонный бумажный материал для внутренней отделки помещений. В современном строительстве различают три основных вида обоев: *обычные* (преимущественно бумажные), *влагостойкие* и *звукопоглощающие* (ворсовые).

Влагостойкие (моющиеся) обои — декоративно-отделочный рулонный материал на бумажной подоснове с лицевой поверхностью, стойкой к мытью и влажному протиранию. Для изготовления таких обоев применяют бумагу массой 100...150 г/м², синтетические лаки, эмульсии полимеров, олифы, пластификаторы, пигменты, а также специальный клей. По внешнему виду их подразделяют на *гладкие обои*, *обои с рельефной печатью* и *фактурные, тисненные и глянцевые*.

Линкруст — рулонный материал, состоит из бумажной подосновы, покрытой слоем пасты (0,5...1 мм) из поливинилхлорида. Поверхность линкруста рифленая. Применяется для внутренней отделки общественных зданий. После наклейки на стены линкруст обычно окрашивают масляной или синтетической красками.

Бумажные сотопласты — искусственный бумажный материал, который изготавливают путем склейки гофрированной бумаги, пропитанной полимером; полупрозрачный, жесткий, плотностью 15...60 кг/м³. Бумажные сотопласты являются эффективным утеплителем в трехслойных панелях. Теплоизоляционные свойства сотопластов повышаются при заполнении ячеек крошкой из *миноры*.

Сотопласты — тонкие листовые материалы, получаемые пропиткой полимерными связующими веществами различных тканей, сложенных в виде гофры и склеенных между собой. В качестве связующих веществ используются фенолоформальдегидные и полиамидные смолы. Сотопласты отличаются достаточно высокими тепло- и электроизоляционными свойствами и радиопрозрачностью и используются как легкие заполнители в многослойных панелях, состоящих из слоев сотопластов и приклеенной к ним несущей обшивки. Такая конструкция обеспечивает высокую жесткость и предохраняет от потери устойчивости, обеспечивая теплозащиту и теплоизоляцию, что находит широкое применение в авиа- и судостроении, а также в криогенной технике.

Мипора — жесткий пенопласт на основе мочевино-формальдегидной смолы. Мипора огнестойка, недостаточно устойчива в агрессивных средах, легко впитывает влагу. Это тепло- и звукоизоляционный материал, используемый в строительстве, транспорте, машиностроении и для теплоизоляции холодильных камер и сосудов для хранения и перевозки жидкого кислорода.

3.2.3. Картон и изделия на его основе

Картон — искусственный материал, состоящий преимущественно из специально обработанных растительных волокон, тесно переплетенных между собой и соединенных силами сцепления, возникающими между волокнами при их обработке. От бумаги отличается большей толщиной и массой 1 м² (более 250 г).

При изготовлении картона широко применяют добавки и покрытия, которые могут обеспечить ему особые свойства: биостойкость, термостойкость, пожаробезопасность, влагопрочность и др.

Наиболее распространенными видами покрытий для картона являются *металлизированные, полимерные, восковые (или парафиновые), латексные* и др.

Картон по назначению подразделяют на *технический, строительный, фильтровальный, тарный, для полиграфического производства* и др.

Технический картон используется в качестве конструкционного материала и может изготавливаться *водонепроницаемым, обивочным, для радиотехнической промышленности, прокладочным, термоизоляционным прокладочным (в том числе биостойким), электроизоляционным, огнестойким, циферблатным* и др.

Прокладочный картон (уплотнительные прокладки с ограниченными показателями впитываемости жидкости и линейной деформации при увлажнении) является бензо- и маслостойким материалом; его выпускают толщиной 0,2...1,5 мм. Влажность 8...10%; впитываемость воды за 24 ч не более 12%, бензина — 20%, масла — 25%.

Электроизоляционный картон (ГОСТ 2824—75) выпускается марок ЭВС, ЭВП, ЭВТ, ЭВ, ЭВА в листах и рулонах при толщине 0,1...3 мм. Плотность электроизоляционного картона 0,95...1,25 г/см²; предел прочности при растяжении 34...127 МПа; электрическая прочность 8...13 кВ/мм.

Строительные картоны разделяют на собственно *строительные, кровельные и облицовочные*.

Строительный картон — это склеенный картон с ограниченными показателями гигроскопичности и линейной деформации при увлажнении, предназначенный для обшивки стен и перегородок помещений.

Кровельный картон — картон с высокой впитывающей способностью, предназначенный для производства битумированных и дегтевых кровельных и гидроизоляционных работ. Кровельный картон получают из тряпья, бумажной макулатуры и древесной целлюлозы, применяя пропитку легкоплавким битумом марки БНК 45/180 (тугоплавкие битумы служат для кровельного слоя).

Облицовочный картон — картон с повышенной воздухопроницаемостью, предназначенный для облицовочного слоя при изготовлении сухой гипсовой штукатурки.

Фильтровальный картон — пористый картон, предназначенный для очистки жидкостей и газов фильтрованием, например *противопыльный (для противопыльных респираторов) картон, картон для фильтрации воздуха, нефтепродуктов и технических масел, дизельного топлива* и др.

Тарный картон — прочный картон, обладающий хорошей способностью к сгибанию. Применяется при изготовлении тары. Подразделяется на *картон для плоских слоев гофрированного картона, собственно гофрированный картон*, а также *коробочный и термосвариваемый*.

Для полиграфического производства выпускается картон *переплетный, цветной склеенный и билетный*, а также *для стереотипных матриц*.

В строительстве широкое распространение получили изделия из картона, например *рубероид, пергамин, толь*.

Рубероид — кровельный рулонный картон, пропитанный расплавленным легкоплавким битумом, имеющий одно или двухстороннее покрытие из тугоплавкого битума с наполнителем и посыпкой (асбестом, тальком и др.).

Для повышения погодоустойчивости рубероида в районах с холодным климатом увеличивают эластичность битума введением полимерных добавок (РЭМ-350), а для предотвращения его гниения вводят антисептики. Крупнозернистая цветная посыпка минеральным порошком не только повышает атмосферостойкость рубероида, но и придает ему привлекательный вид.

Рубероид делят на марки в зависимости: от назначения — *кровельный* (К), *подкладочный* (П), вида посыпки — *крупнозернистая* (К), *мелкозернистая* (М), *пылевидная* (П), *чешуйчатая* (Ч) — и массы 1 м² основы: РКК-500А, РКК-400А, РКК-400Б, РКК-400В, РКМ-350Б, РКМ-400В, РПМ-300А, РПМ-300Б, РПМ-300В, РПП-350Б, РПП-350В, РПП-300А, РПП-300Б, РПП-300В.

Рубероид РКК обладает следующими физико-техническими показателями: прочность на разрыв полосы рубероида шириной 50 мм — не менее 320 Н; водонепроницаемость образца площадью 78,5 см² (диаметром 100 мм) при гидростатическом давлении — до 0,07 МПа; обладает хорошей гибкостью, при изгибании вокруг стержня диаметром 30 мм не возникают трещины и отслоения; температура размягчения пропиточной массы — не ниже 40°С и покровной массы — 85...90°С.

При хранении рубероида в рулонах на его внутренние и внешние поверхности должна быть нанесена мелкозернистая или пылевидная посыпка для предотвращения слипания.

Пергамин — кровельный рулонный беспокровный картон, пропитанный расплавленным нефтяным битумом с температурой размягчения не ниже 40°С. Пергамин — гибкий и водонепроницаемый материал. Под давлением 0,01 МПа в течение 10 мин не должно быть признаков проникновения воды, водопоглощение — не более 20%, а разрывная нагрузка — не менее 270 Н. Пергамин используется в качестве подкладочного материала под рубероид и для пароизоляции.

Толь — кровельный картон, пропитанный каменноугольными или сланцевыми дегтевыми продуктами с последующим нанесением минеральной посыпки на лицевую и нижнюю поверхности. Толь выпускают в виде *кровельного толя с крупнозернистой* (ТКК) и *песочной* (ТКП) *посыпками* и *гидроизоляционного толя с покровной пленкой* (ТГ). Толь с крупнозернистой посыпкой применяют для верхнего слоя плоских кровель, а толь с песочной посыпкой — для кровель временных сооружений. Гидроизоляционный толь выпускают без покровного слоя и посыпки и используют в качестве подкладочного материала под толь при устройстве многослойных кровель, а также для паро- и гидроизоляции. В разрыве материал должен иметь черный цвет без светлых прослоек непропитанного картона.

3.3. Резиновые материалы

3.3.1. Общие сведения

Резина — искусственный материал, получаемый специальной обработкой (вулканизацией) смеси каучука с различными добавками.

Вулканизация — превращение каучука в резину, осуществляемое с участием так называемых вулканизирующих агентов (например, серы) или под действием ионизирующей радиации.

При вулканизации синтетических каучуков их макромолекулы связываются поперечными связями (мостиками из серы), что позволяет повысить механическую прочность, эластичность и теплостойкость получаемых материалов — вулканизированных каучука и резины. В отличие от каучуков резины не имеют пластических деформаций и не растворяются в органических растворителях. При нормальной температуре резина находится в высокоэластичном состоянии. Ее эластичные свойства сохраняются в широком диапазоне температур.

Основные потребительские свойства резиновых материалов: плотность ($910...2050 \text{ кг/м}^3$); низкая теплопроводность; эластичность ($E = 1...10 \text{ МПа}$; $\delta = 1000\%$) при времени релаксации более 10^{-4} с ; несжимаемость ($\mu = 0,4...0,5$); диэлектрические свойства ($\rho_{ог} = 10^{10}...10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{см}$; $\epsilon = 2,5...4$; $\text{tg } \delta = 0,005...0,01$); химическая стойкость; низкие газо- и водопроницаемость; высокое сопротивление разрыву и износу.

В настоящее время резиновые материалы классифицируются *по виду сырья, виду наполнителя, степени упорядочения макромолекул и пористости, технологическим способам переработки, типам теплового старения и изменению объема после пребывания в нефтяной жидкости.*

Классификация по виду сырья учитывает наименование каучуков, явившихся исходным сырьем при производстве резиновых материалов: НК — натуральный каучук, СКБ — синтетический каучук бутадиеновый, СКС — бутадиен-стирольный каучук, СКИ — синтетический каучук изопреновый, СКН — бутадиен-нитрильный каучук, СКФ — синтетический фторосодержащий каучук, СКЭП — сополимер этилена с пропиленом, ХСПЭ — хлорсульфополиэтилен, БК — бутилкаучук, СКУ — полиуретановые каучуки.

По виду различают наполнители для резиновых материалов *порошкообразные и ткани.*

По степени упорядочения макромолекул и пористости резиновые материалы могут быть *мягкими, жесткими (эбонитовыми), пористыми (губчатыми) и пастообразными.* Плотность губчатой резины $100...750 \text{ кг/м}^3$.

Среди технологических способов переработки для резиновых материалов используются *выдавливание, прессование и литье.*

По тепловому старению существуют *семь типов: Т07, ..., Т25.*

По изменению объема после пребывания в нефтяной жидкости различают *семь классов: К1, ..., К7.*

Наиболее крупные потребители резины — шинная промышленность (свыше 50%) и промышленность резинотехнических изделий (более 22%).

3.3.2. Состав резиновых материалов

Основной компонент резиновых материалов — каучук. В качестве добавок при производстве резиновых материалов используются *вулканизирующие вещества, ускорители вулканизации, активаторы ускорителей, наполнители, противостарители, пластификаторы и красители*.

Вулканизирующие вещества (вулканизаты) — обязательные компоненты резиновых материалов; они участвуют в образовании пространственно-сетчатой структуры резины. Для вулканизации наиболее широко применяется сера. Ее количество в резиновых материалах может изменяться от 1 до 40% массы каучука, при этом увеличение содержания серы приводит к возрастанию твердости резиновых материалов. При максимально возможном насыщении каучука серой образуется твердый и жесткий материал, называемый *эбонитом*. Эбонит обладает высокой химической стойкостью, хорошими диэлектрическими свойствами, легко обрабатывается, но имеет низкую теплостойкость.

Наряду с серой в качестве вулканизаторов применяются селен и тиурам.

Тиурам — органическое сернистое соединение, в отличие от серы не взаимодействующее с медью. Использование тиурама вызвано техническими требованиями к резиновым материалам, предназначенным для электротехнической промышленности.

Ускорители вулканизации применяются для повышения технико-экономических показателей процесса вулканизации, так как они влияют на режим вулканизации и физико-механические свойства вулканизирующих веществ. В качестве ускорителей вулканизации используют оксиды свинца и магния, а также различные полисульфиды в количестве 0,5...1,5% массы каучука. Активаторами ускорителей являются цинковые белила и магnezия.

Наполнители используются в производстве как для снижения стоимости резиновых материалов, так и для придания им необходимых физико-механических и потребительских свойств. Среди порошкообразных наполнителей наиболее широкое применение находят сажа, каолин, мел, тальк, а в качестве тканей-наполнителей используют корд, бельтинг, рукавные и другие ткани из крученых синтетических (реже хлопчатобумажных) нитей повышенной прочности. Характер взаимодействия наполнителей с каучуком определяет их как *активные* (например, сажа повышает механические свойства) или *инертные* (мел и тальк удешевляют стоимость резиновых материалов). В качестве наполнителя часто вводят *регенерат* — продукт переработки старых резиновых изделий и отходов резинового производства. Кроме снижения стоимости регенерат повышает качество резины, снижая ее склонность к старению. Количество наполнителей определяется как остальное по массе каучука после вычитания содержания необходимых добавок.

Противостарители (антиоксиданты) замедляют процесс старения и обеспечивают эксплуатационные свойства резиновых материалов. Различают *химические противостарители* (альдолы, неозон Д и др.), которые задерживают окисление каучука, и *физические* (парафин, воск и др.), которые создают защитные пленки.

Пластификаторы облегчают переработку резиновой смеси и обеспечивают совмещение каучука с наполнителем. В качестве пластификаторов применяют канифоль, парафин, стеариновую кислоту и др. Количество пластификаторов может составлять 8...30% массы каучука. Пластификаторы повышают пластичность и (или) эластичность, а также морозостойкость резины.

Красители в резиновых материалах, так же как противостарители, используются для улучшения эксплуатационных свойств. Так, например, белые, желтые и зеленые красители защищают от светового старения. В качестве красителей применяют охру, ультрамарин и др. в количестве до 10% массы каучука. Для получения светлоокрашенных резин, предназначенных для работы в условиях повышенных температур, вместо наиболее распространенного наполнителя — сажи — используют оксиды кремния или титана.

3.3.3. Классификация резиновых материалов по назначению и области применения

Резиновые материалы делят на группы *общего и специального назначения*.

Для резин общего назначения основными компонентами являются неполярные каучуки — НК, СКИ, СКС и СКБ. Резины на основе НК отличаются высокой эластичностью, прочностью, водо- и газонепроницаемостью, высокими электроизоляционными свойствами: $\rho_{ov} = 3 \cdot 10^{14} \dots 23 \cdot 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{см}$; $\epsilon = 2,5$. Наибольшее распространение в промышленности получили резины на основе СКС (СКС-10, СКС-30, СКС-50). Это те резины, которые хорошо работают при многократных деформациях, имеют хорошее сопротивление старению; по газонепроницаемости и диэлектрическим свойствам равноценны резинам на основе НК.

Резиновые материалы общего назначения используются для производства изделий, работающих в воде, на воздухе, в слабых растворах кислот и щелочей при температурах эксплуатации $-35 \dots +130^\circ\text{C}$. Таковыми изделиями являются шины, рукава, конвейерные ленты, изоляция кабелей и др.

Резиновые материалы специального назначения делятся на *бензино-маслостойкие, химически стойкие, коррозионно-стойкие, светостойкие, тепло- и морозостойкие, электротехнические и износостойкие*.

Бензиномаслостойкие резиновые материалы изготавливают на основе наирита, тиокола, СКН и других типов каучуков. Их основными потребительскими свойствами являются устойчивость к воздействию гидравлических жидкостей, масло-, бензино- и озоностойкость, а также водонепроницаемость. Резины, стойкие к воздействию гидравлических жидкостей, изготавливают: для работы в масле — на основе СКН, для кремнийорганических жидкостей — на основе каучуков НК, СКМС-10 и др.

Бензиномаслостойкие резины на основе каучуков СКН могут работать в среде бензина, топлива, масел в интервале температур $-30...+130^{\circ}\text{C}$. Акрилатные резины (марки БАК) теплостойки, обладают адгезией к полимерам и металлам, стойки к действию серосодержащих масел и кислорода, но обладают малой эластичностью, низкой морозостойкостью и невысокой стойкостью к воздействию горячей воды и пара. Из бензиномаслостойких резин изготавливают шины, варочные камеры, диафрагмы и т.д. Акрилатные резины широко применяют в автомобилестроении.

Химически стойкие резиновые материалы изготавливают на основе бутилкаучука. К изделиям из таких резин предъявляются повышенные требования по масло-, бензино-, растворителе- и теплостойкости. Они используются, например, для изготовления транспортных лент подачи горючих материалов.

Коррозионно-стойкие резиновые материалы изготавливают на основе ХСПЭ. Они являются незаменимым конструкционным материалом для изделий, работающих в морской воде. Кроме всего прочего, они не обрастают при эксплуатации водорослями и микроорганизмами.

Светоозоностойкие резиновые материалы изготавливают на основе насыщенных каучуков — СКФ, СКЭП, ХСПЭ и БК. Резины на основе фторосодержащего каучука СКФ устойчивы к тепловому старению, воздействию масел, топлива, различных растворителей (даже при повышенных температурах), негорючие, обладают высоким сопротивлением истиранию, но имеют низкую эластичность и малую стойкость к большинству тормозных жидкостей. Резины на основе СКФ и этиленпропиленовых каучуков СКЭП стойки к действию сильных окислителей (HNO_3 , H_2O_3 и др.) и не разрушаются при работе в атмосферных условиях в течение нескольких лет. Резины на основе хлорсульфополиэтиленового каучука ХСПЭ применяют как конструкционный материал (противокоррозионные, не обрастающие в морской воде водорослями и микроорганизмами покрытия), а также для защиты от гамма-излучения. Резины на основе бутилкаучука БК широко применяют в шинном производстве, а также для изготовления изделий, работающих в контакте с концентрированными кислотами и другими химикатами. Светоозоностойкие резиновые материалы предназначены для масло- и бензиностойких изделий — гибких шлангов, диафрагм, уплотнителей и др.

Теплостойкие резиновые материалы изготавливают на основе НК, СКТ и СКС. Морозостойкими являются резины на основе каучуков, имеющих низкие температуры стеклования, например НК, СКС-10, СКТ. Эти резиновые материалы используются для сверхтепло- и морозостойких изделий, электротехнических деталей и др.

Электротехнические резиновые материалы делятся на две группы: *изоляционные и проводящие*. Электроизоляционные резиновые материалы изготавливают на основе неполярных каучуков, например НК, СКБ, СКС, СКТ и БК. Их электрические свойства: $\rho_{ov} = 10^{11} \dots 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{см}$; $\epsilon = 2,5 \dots 4$; $\text{tg } \delta = 0,005 \dots 0,01$. Электропроводящие резины для экранированных кабелей получают из натурального, синтетического бутадиенового каучуков, наирита с обязательными добавками сажи и графита в количестве 65...70% по массе каучука. Удельное электросопротивление проводящих резин $\rho_{ov} = 10^2 \dots 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Износостойкие резиновые материалы изготавливают на основе СКУ. Рабочие температуры резин составляют $-30 \dots +130^\circ\text{C}$. Они предназначены для производства шин, амортизаторов, буферов, клапанов, обкладок в транспортных системах, для абразивных материалов, обуви и др.

3.4. Органические вяжущие вещества и материалы на их основе

3.4.1. Битумные и дегтевые вещества

Органические вяжущие вещества — природные или искусственные коллоидные системы, в которых диспергированы твердые частицы ($d = 18 \dots 20 \text{ мкм}$), а дисперсной средой являются смолы и масла. Органическими вяжущими являются *битумные и дегтевые вещества*.

Вяжущие вещества — строительные материалы, применяемые для изготовления строительных растворов и бетонов. Различают *неорганические* (цемент, гипс, известь и др.) и *органические* (битумы, дегти, пеки) *минеральные вяжущие вещества*.

Органические минеральные вяжущие вещества классифицируются по происхождению и способу образования (производства). Битумные вещества по происхождению могут быть *природными* (горные смолы) и *искусственными*. Природные органические минеральные вяжущие вещества, например горные смолы, возникают в процессе естественной окислительной полимеризации нефти, а искусственные битумные вещества получают в результате переработки нефтяного сырья. Дегтевые вещества (деготь и пек) получают только искусственным путем в процессе нагревания без доступа воздуха твердых видов топлива (угля, сланца, торфа, древесины).

Важнейшие свойства битумов и дегтей: высокая гидрофобность, водонепроницаемость, стойкость против действия кислот, щелочей, агрессивных жидкостей и газов, атмосферостойкость, растворимость в органических растворителях, повышенная деформируемость, способность прочно сцепляться с каменными материалами, деревом, металлом, приобретать пластичность при нагревании и быстро увеличивать вязкость при остывании.

Битумы — смеси углеводородов, в том числе и предельных (от C_9H_{20} до $C_{30}H_{62}$), и их кислородных, сернистых и азотистых производных. Битумы содержат 70...80% C, 10...15% H_2 , 1...5% O_2 и 0...2% N_2 . Вещественный состав битумов включает твердую, аморфную и жидкую части. Твердая часть битумов представлена *асфальтенами* и *парафинами*, аморфная — смолами, а жидкая — маслами.

Асфальтены битума — окисленные углеводороды, диспергированные в виде частиц размером 18...20 мкм, каждая из которых окружена оболочкой с убывающей плотностью от тяжелых смол к маслам. Парафин, содержащийся в нефтяных битумах, представляет собой смесь воскоподобных предельных углеводородов. Он ухудшает свойства битумов, повышает хрупкость при пониженных температурах, поэтому стремятся к тому, чтобы содержание парафина в битуме не превышало 5%.

Молекулярная масса различных вещественных частей битумов составляет: для твердой части — 5000, для аморфной части — 500...1000 и для жидкой части — 100. Соответственно молекулярной массе меняются значения плотности, $кг/м^3$: для твердой части — 1300, для аморфной части — 1000, для жидкой части — 800.

В битумах соотношение вещественных частей может колебаться в достаточно широких пределах, что определяет большой диапазон изменения их свойств. Повышение содержания асфальтенов и смол вызывает возрастание твердости, температуры размягчения и хрупкости битума. Наоборот, масла, частично растворяющие смолы, делают битум мягким и легкоплавким. Снижение молекулярной массы масел и смол также повышает пластичность битума.

Свойства битумов: плотность 0,8...1,3 $кг/м^3$; теплопроводность 0,5...0,6 $Вт/(м \cdot K)$; теплоемкость 1,8...1,97 $кДж/(кг \cdot K)$; температурный коэффициент линейного расширения при 25°C $(5...8) \cdot 10^{-4} K^{-1}$; устойчивость при нагревании, $t_{раб} = 50...95^\circ C$; поверхностное натяжение 25...35 $Эрг/см^2$; водо- и химическая стойкость.

При нагревании битум переходит в пластическое состояние; в таком состоянии он хорошо прилипает к дереву, кирпичу, бетону, а затвердев, прочно сцепляется с их поверхностью. В воде битум не растворяется.

Для битумов характерно значительное старение под действием солнечного света и кислорода, при этом повышается хрупкость и снижается гидрофобность материала.

По консистенции (при температуре 18°C) битумы делят на *твердые*, *полутвердые* и *жидкие*. Марку твердого битума определяют твердостью, температурой размягчения и растяжимостью.

По области применения битумы классифицируют на *связующие*, *гидро- и электроизолирующие*, *антикоррозионные* и *антисептические*.

Битумы, применяемые в качестве связующего материала, различают как *строительные* (ГОСТ 6617—76), *кровельные* (ГОСТ 9548—74) и *дорожные*.

Строительные битумы (БН-50/50, БН-70/30, БН-90/10) применяют для изготовления асфальтовых бетонов и растворов, приклеивающих и изоляционных мастик, для покрытия и восстановления рулонных кровель. Кровельные битумы (БНК-45/180, БНК-90/40, БНК-90/30) используются для изготовления кровельных рулонных и гидроизоляционных материалов.

Способы перевода твердых битумов в рабочее состояние:

- 1) нагревание до 140...170°C, размягчающее смолы и увеличивающее их растворимость в маслах;
- 2) растворение в органическом растворителе для придания рабочей консистенции без нагрева (холодные мастики и др.);
- 3) эмульгирование и получение эмульсий и паст.

Дегтевые вяжущие вещества подразделяются на следующие виды: *сырой каменноугольный деготь* (ГОСТ 4641—80), *отогнанный деготь*, *пек* (ГОСТ 1038—75) и *составленные дегти*. В состав дегтевых вяжущих веществ входят в основном углеводороды ароматического ряда — производные бензола и их соединения с кислородом, азотом и серой.

Атмосферостойкость дегтевых материалов ниже по сравнению с битумными материалами, так как дегтевые вяжущие вещества содержат большее количество непредельных углеводородов, которые подвергаются окислительной полимеризации при контакте с кислородом и водой, воздействию ультрафиолетовых лучей, а следовательно, и стареют быстрее нефтяных битумов. При старении дегтевые материалы становятся хрупкими и теряют водоотталкивающие свойства.

Высокие показатели (по сравнению со значениями для битумов) биостойкости и стойкости против гниения дегтевых вяжущих веществ объясняются большой токсичностью содержащегося в дегтях фенола (карболовой кислоты).

В состав каменноугольного дегтя входят следующие группы веществ:

- твердые (углистые и неплавкие вещества), не растворимые в органических растворителях;
- дегтевые смолы твердые неплавкие (подобные асфальтенам в битуме) и вязкопластичные смолы, растворимые в бензоле и хлороформе;
- жидкие дегтевые масла, состоящие из жидких углеводородов.

Плотность каменноугольных дегтей составляет 960...1090 кг/м³, пека — 1190...1300 кг/м³. Температуры размягчения пека 50...60°С.

Каменноугольный деготь применяют для пропитки гидроизоляционных материалов и при устройстве дорог, пек — как вяжущее вещество в мастиках для крепления дегтевых гидроизоляционных и облицовочных материалов. При работе с каменноугольными дегтями и пеками следует помнить, что они и их пары токсичны.

3.4.2. Асфальтовые строительные растворы и бетоны

Строительный раствор — смесь мелкого минерального заполнителя и вяжущего вещества, приобретающая с течением времени камнеподобное состояние.

Асфальтовый раствор — строительный раствор на основе асфальтового вяжущего и мелкого минерального заполнителя.

Асфальтовое вяжущее вещество — смесь нефтяного битума с тонкомолотыми минеральными наполнителями — порошками известняка, доломита, мела, асбеста, шлака. Мелкий наполнитель в асфальтовом вяжущем веществе не только уменьшает расход битума, но и повышает температуру размягчения бетона. Прочность асфальтового вяжущего вещества обусловлена соотношением компонентов битума и наполнителя (Б/Н) и пористостью после уплотнения и затвердевания. При оптимальном соотношении Б/Н весь битум адсорбирован в виде тонких непрерывных пленок на поверхности частиц тонкомолотого наполнителя, поэтому асфальтовое вяжущее вещество имеет наибольшую прочность. Для повышения биостойкости в состав битумного вяжущего вещества вводят антисептики.

Мелким минеральным заполнителем в асфальтовых растворах являются чистые природные и искусственные пески с содержанием пылеватоглинистых частиц не более 3% по массе.

Состав асфальтового раствора должен быть такой, чтобы пустоты в песке были полностью заполнены асфальтовым вяжущим веществом с избытком 10...15% для обволакивания песчинок.

Бетон — искусственный каменевидный материал, получаемый в результате затвердевания уплотненной смеси вяжущего вещества, заполнителей и в некоторых случаях специальных добавок.

Асфальтовые бетоны — искусственный каменевидный материал на основе асфальтового раствора и крупного минерального заполнителя (щебня из прочных и морозостойких изверженных, осадочных и метаморфических горных пород, а также из металлургических шлаков).

Асфальтовые бетоны укладывают в горячем или холодном (на жидких битумах и битумной эмульсии) состоянии. Формирование структуры при горячем способе укладки происходит в период уплотнения, а при холодном продолжается 10...30 суток.

Потребительские свойства асфальтового бетона зависят от примененного асфальтового вяжущего вещества, состава бетона и его пористости. Наиболее агрессивными компонентами по отношению к битуму, которые могут содержаться в воде, являются сульфаты натрия и магния.

Асфальтовые бетоны делят: *по виду крупного заполнителя* (щебеночные и гравийные); *по температуре*, при которой укладывают и уплотняют смесь в покрытия, и *вязкости* применяемого битума (*горячие* — 80...110°C, *теплые* — 40...60°C и *холодные* — 15...20°C); *по максимальной крупности зерен минерального наполнителя* (*крупно-* — до 40 мм, *средне-* — до 25 мм, *мелкозернистый* — до 15 мм и *песчаный* — до 5 мм).

По пористости асфальтовые бетоны можно разделить на *плотные* и *газовоздушные*. Пористость плотного асфальтового бетона обычно 5...7%. Такие бетоны практически водонепроницаемы. Пористость ухудшает долговечность асфальтового бетона, так как с ее возрастанием увеличивается водопоглощение, снижаются морозо- и коррозионная стойкость.

На показатели прочности асфальтового бетона, в отличие от цементного, сильно влияет температура. Например, если предел прочности при сжатии асфальтобетона при 20°C равен 2,2...2,4 МПа, то при 50°C — только 0,8...1,2 МПа. Асфальтовые бетоны и растворы лучше, чем цементные, противостоят коррозии.

Асфальтовые бетоны по назначению подразделяют на *гидротехнические*, *дорожные* и *аэродромные*, для устройства полов в промышленных цехах и складских помещениях, для плоской кровли и стяжек.

Гидротехнические асфальтовые бетоны используют для устройства экранов и в уплотняющих конструкциях (швах) сооружений, а также в качестве гидроизоляционных слоев при строительстве каналов, шлюзов, ирригационных сооружений. При модифицировании битумного вяжущего вещества полимером (латексом, бутилкаучуком и др.) получают *асфальтополимербетон*, применяемый для устройства монолитных и сборных противофильтрационных экранов и облицовок гидросооружений, возводимых в районах Крайнего Севера. Специальные виды плотного бетона, изготовленного на химически стойких заполнителях, применяют для создания кислото- и щелочестойких покрытий. Имеются декоративные асфальтовые бетоны (цветные и с заданной фактурой), из которых выполняются разделительные полосы на дорогах, переходы, полы вестибюлей гражданских зданий.

Газоасфальт изготовляют на основе битумно-известковой пасты с добавкой 10...15% портландцемента и алюминиевой пудры в качестве газообразователя. Используют в конструкциях кровельных панелей и теплогидроизоляции трубопроводов.

Дегтебетон — материал, аналогичный асфальтобетону. В дегтебетон в качестве вяжущего вещества входят деготь (марок Д-5, ..., Д-8) или пек. По крупности заполнителя дегтебетон также делят на *крупно-, средне- и мелко-зернистый*. Водостойкость, износ и долговечность дегтебетона ниже, чем асфальтового бетона. Он менее пластичен и больше деформируется в холодное время. Дегтебетон применяют для дорог III категории и для ремонта.

3.4.3. Мастики кровельные и гидроизоляционные

Мастика — смесь нефтяного битума или дегтя (отогнанного и составленного) с минеральным наполнителем и добавкой антисептика.

Наполнители адсорбируют на своей поверхности масла, при этом повышаются теплостойкость и твердость мастики. По виду наполнители делят на *пылевидные* (измельченный тальк, магнезит, известняк, доломит, мел, цемент, золы твердых видов топлива) и *волокнистые* (асбест, минеральная вата и др.). Волокнистые наполнители, армируя материал, увеличивают его сопротивление изгибу.

Мастики классифицируют по следующим основным признакам: *назначению, виду исходных компонентов, виду разбавителя, характеру твердения и способу применения*.

По назначению мастики подразделяют на:

приклеивающие — для приклеивания рулонных кровельных и гидроизоляционных материалов и для устройства защитного слоя кровель;

кровельно-изоляционные — для устройства мастичных кровель;

гидроизоляционные — для устройства мастичных слоев гидро- и пароизоляции;

антикоррозионные — для изоляции стальных подземных трубопроводов и других сооружений с целью защиты их от коррозии.

В зависимости от вида основных исходных компонентов мастики подразделяют на: *битумные, битумно-эмульсионные, битумно-резиновые, битумно-полимерные, полимерные, дегтевые и дегтеполимерные*.

Битумно-резиновые мастики — сплав из битума, порошка резины и некоторых добавок — применяются для изоляции стальных подземных трубопроводов. Их используют в горячем виде и в холодном состоянии — с растворителем. *Битумно-полимерные мастики* содержат добавку каучука или синтетической смолы, придающих им эластичность на морозе и теплостойкость.

По виду разбавителя мастики подразделяют на содержащие *воду, органические растворители или жидкие органические вещества* (нефтяные масла, машинное, трансформаторное и другие жидкие нефтяные битумы, гудрон, мазут).

По характеру твердения мастики подразделяют на *твердеющие* (в том числе вулканизирующиеся) и *нетвердеющие*.

По способу применения мастики подразделяют на *горячие*, применяемые с предварительным подогревом до 160°C для битумных и до 130°C для дегтевых мастик, и *холодные мастики*, имеющие растворитель и используемые без подогрева при температуре воздуха не ниже 5°C и с подогревом до 60...70°C при температуре воздуха ниже 5°C.

3.4.4. Нефтяные эмульсии и пасты

В нефтяных эмульсиях битум или деготь (50...60%) диспергированы в виде частиц размером примерно 1 мкм.

Устойчивость эмульсии достигается введением в нее эмульгаторов — поверхностно-активных веществ, уменьшающих поверхностное натяжение на поверхности раздела битум (деготь) — вода. Водорастворимыми эмульгаторами являются мыла нафтенowych, сульфонафтенowych, смоляных органических кислот, сульфитно-дрожжевая бражка. К твердым эмульгаторам относятся тонкие порошки глин, извести, цемента, каменного угля, сажи. Твердые эмульгаторы, как и водорастворимые, адсорбируются на поверхности частиц (глобул) битума или дегтя, образуя защитный слой, препятствующий слипанию частиц, диспергированных в воде. Содержание водорастворимых эмульгаторов в эмульсии обычно не превышает 3%, а твердых эмульгаторов — 5...15% в зависимости от вида эмульгатора и дисперсности битумной (дегтевой) фазы.

При взаимодействии эмульсии с каменными материалами (щебнем и песком) происходит ее распад вследствие адсорбции эмульгатора, поглощения и испарения воды, при этом битум (деготь) обволакивает и связывает между собой зерна наполнителя.

Эмульсии применяют для грунтовок основания под гидроизоляцию, приклеивания рулонных и штучных битумных и дегтевых материалов, для устройства гидро- и пароизоляционных покрытий и в качестве вяжущего вещества при изготовлении асфальтовых (дегтевых) растворов и бетонов.

Нефтяные пасты — высококонцентрированные нефтяные эмульсии, в том числе с твердыми эмульгаторами. Содержание битума (дегтя) в пастах 60...70%.

МАТЕРИАЛЫ ИЗ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

К неорганическим минеральным веществам относят как химические элементы, так и различные соединения, главным образом оксиды и бескислородные соединения элементов, не обладающие металлическими свойствами.

Материалы из неорганических минеральных веществ отличаются химической стойкостью, негорючестью, твердостью, стойкостью к нагреву, стабильностью свойств, но имеют высокую хрупкость, низкую стойкость при теплосменах, растягивающих и изгибающих нагрузках.

4.1. Разрыхленные, дисперсные и каменные материалы

4.1.1. Каменные природные материалы

4.1.1.1. Общие сведения

Главный источник получения природных каменных материалов — горные породы.

Каменные природные материалы — строительные материалы (изделия), получаемые из горных пород путем механической обработки (дробление, распиливание, раскалывание и т.п.), после которой почти полностью сохраняются структура и свойства исходной породы.

По способу изготовления каменные природные материалы можно разделить на следующие виды.

- *Пиленые*, получаемые из массива камнерезными или камнекольными машинами (*блоки-полуфабрикаты, крупные камни*).
- *Пиленые из блоков-полуфабрикатов с последующей камнеобработкой* (стенные камни и блоки, облицовочные плиты и плиты для пола, цельные ступени и подоконные доски и т.п.).

Камнеобработка — процесс придания природному камню требуемой формы и внешней отделки. Включает распиловку блоков на заготовки, окантовку плит по размеру и фактурную обработку лицевой поверхности.

- *Колотые*, получаемые раскалыванием блоков с последующей обработкой (бортовые камни, плиты и камни тесаные, брусчатка и шашки для мощения и др.).

- *Грубоколотые*, получаемые направленным раскалыванием блоков без последующей обработки.

- *Рваные (бутовый камень)*, получаемые взрыванием горной породы и отделением мелких фракций.

- *Дробленые*, получаемые дроблением горной породы с последующим разделением на фракции (щебень, песок искусственный).

- *Молотые*, получаемые помолом горной породы (молотый минеральный порошок, каменная мука).

По наличию обработки поверхности каменные природные материалы можно разделить на следующие основные виды.

- *Природные строительные камни (каменные изделия)* — пиленые стеновые материалы и облицовочные камни, архитектурно-строительные (профилированные) изделия (ступени, подоконники и др.), дорожные каменные материалы (бортовые камни, брусчатка), изделия для гидротехнических сооружений, облицовки опор мостов, технические изделия (доски мраморные электротехнические, плиты поверочные, валы гранитные для бумагоделательного оборудования и др.) и декоративно-художественные изделия.

- *Грубообработанные каменные материалы* — бутовый и валунный камни, щебень, гравий, песок.

Частое изменение температуры и влажности, вызывающее появление микротрещин; растворяющее действие воды и понижение прочности при водонасыщении; химическая коррозия, происходящая под действием газов (O_2 , H_2 и др.), содержащихся в атмосфере, и веществ, растворенных в грунтовой и морской воде; замерзание воды в порах и трещинах, вызывающее внутренние напряжения, — это основные причины разрушения природных каменных материалов.

Для защиты каменных материалов от разрушения применяют *конструктивные и физико-химические способы*.

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

К физико-химическим способам защиты каменных материалов от разрушения относятся пропитка поверхностного слоя уплотняющими составами и нанесение на лицевую поверхность гидрофобных (водоотталкивающих) составов. Для *гидрофобизации*, т.е. покрытия и пропитки гидрофобными составами (например, кремнийорганическими жидкостями),

применяют пленкообразующие полимерные материалы — прозрачные и окрашенные. Для пропитки пористых каменных материалов применяют мономеры с дополнительной термокаталитической или радиационной обработкой, обеспечивающей полимеризацию мономера в порах каменного материала.

4.1.1.2. Природные строительные камни

Общие сведения. *Природные строительные камни* (штучные изделия) — это строительный материал, получаемый из горных пород путем распиливания (раскалывания, разрезания и др.) с сохранением исходных структуры и свойств.

Обязательными потребительскими свойствами этих материалов являются плотность, прочность, теплопроводность, истираемость, износ, водо-, морозо- и огнестойкость.

Природные строительные камни называются *легкими*, если их плотность не превышает 1800 кг/м^3 , а если превышает — *тяжелыми*. Их теплопроводность зависит от их плотности (пористости), которая меняется в очень широких пределах, и влажности. Так, для вулканического туфа она равна $0,5 \dots 0,8 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$.

Для оценки морозостойкости используется маркировка по числу циклов попеременного замораживания и оттаивания: F 10, F 15, ..., F 400, F 500. Величина этого показателя зависит от состава, строения и влажности природных строительных камней. Высокую морозостойкость имеют плотные камни с равномерно-зернистой структурой. Слоистая структура существенно снижает морозостойкость.

Огнестойкость зависит от минерального состава и структуры камня. Одни породы при повышенной температуре разлагаются (гипс при 100°C , известняк при 900°C), другие (гранит, кварцевые порфиры) растрескиваются уже при температуре 600°C вследствие различного теплового расширения составляющих их минералов и полиморфного превращения кварца.

Маркировку осуществляют по величине предела прочности на сжатие $\sigma_{\text{сж}}$ (МПа) образцов в воздушно-сухом состоянии.

Природные строительные камни классифицируют по назначению и виду обработки поверхности.

По назначению природные строительные камни делятся на *стеновые, облицовочные (плиточные), профилированные* (ступени, подоконники и др.) и *дорожные*.

По виду обработки различают *ударную, абразивную и термическую*, каждая из которых обладает только ей присущей фактурой поверхности. Так, для ударной обработки характерны *бугристая (скальная), рифленая,*

бороздчатая и точечная фактуры, для абразивной обработки — пиленая, шлифованная, лощеная и зеркальная, а для термической — глазу рованная.

Стеновые камни получают из плотных и пористых разновидностей туфов и известняков. Общие требования, предъявляемые к ним: химический состав; отсутствие трещиноватости и видимых прослоек глины и мергеля (монолитность); плотность — менее 2300 кг/м³ (900...2200 кг/м³); предел прочности при сжатии, МПа: пористые известняки-ракушечники — 0,4...5, плотные известняки — 5...15, туфы — 5...40, водопоглощение W_B — менее 30% по массе; водостойкость (коэффициент размягчения 0,6...0,7); морозостойкость — не менее F 15 (при потере не более 25% от $\sigma_{сж}$); легкость вбивания и прочность удержания гвоздей; внешний вид (лицевая поверхность стеновых камней и крупных стеновых блоков должна отвечать требованиями декоративности); возможность скульптурной обработки и др.

Мелкопористые природные камни не требуют наружной штукатурки или облицовки.

Стеновые камни из известняков и туфов, применяемые для кладки стен (тип I), а также для перегородок и других частей зданий и сооружений (тип II) выпускаются следующих марок: 4, 7, 10, 15, 25, 35, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 300 и 400. Номера марок соответствуют значению предела прочности (кгс/см²) при сжатии. Прочность от 4 до 50 кгс/см² имеют пористые известняки — ракушечники, плотные мшанковые известняки имеют прочность от 50 до 150 кгс/см², туфы — от 50 до 400 кгс/см².

Блоки стеновые из природного камня должны иметь длину 500...3020 мм, ширину в пределах 20...1000 мм и высоту 300, 400 и 500 мм. Для блоков нормируются линейные размеры при допустимых отклонениях менее 10 мм. Каждый такой камень заменяет в кладке 8...12 кирпичей. Укрупнение камней уменьшает затраты труда, позволяет перейти к индустриальным методам строительства. Масса одного камня не должна превышать 40 кг.

Основные размеры стеновых камней: 390×190×188, 490×240×188, 390×190×288 мм. Допустимые отклонения не должны превышать 10 мм. Крупные стеновые блоки, предназначенные для механизированной укладки, имеют размеры от 300×800×900 до 3000×1000×500 мм.

Пиленые и колотые штучные камни, получаемые из известняков, доломитов, песчаников, вулканических туфов, применяют для кладки надземных стен (устоев мостов, укреплений откосов насыпей и берегов рек, кладки подпорных стенок).

Облицовочные камни. Облицовочными камнями называют горные породы, имеющие красивую окраску и рисунок (декоратив-

ность), обладающие необходимой прочностью и погодостойкостью, а также монолитностью, обеспечивающей возможность получения крупных блоков.

Облицовочные плиты изготовляют из блоков природного камня путем их распиливания или раскалывания с последующей механической обработкой. Горные породы, применяемые для изготовления блоков, должны иметь предел прочности при сжатии не менее 5 МПа, морозостойкость не менее F 15, коэффициент размягчения 0,7...0,9.

Общие требования, предъявляемые к облицовочным камням:

- химический состав;
- прочность, МПа: изверженных — 60...90, метаморфических — 30...50, осадочных — 5...20;
- водопоглощение $W_v > 25\%$;
- коэффициент размягчения — более 0,7;
- морозостойкость — более F 25;
- истираемость половых плит: для интенсивного движения людских потоков — менее 0,48 г/см², для слабого движения людских потоков — 2,2 г/см²;
- декоративность.

Морозостойкость, водопоглощение и коэффициент размягчения для изверженных пород не нормируются.

Облицовочные камни классифицируются по различным признакам: *генетическому, по прочности, обрабатываемости, долговечности, степени декоративности и назначению.*

По генетическому признаку камни подразделяют на *изверженные, осадочные и метаморфические породы.*

По прочности они подразделяются на три группы в зависимости от величины предела прочности на сжатие (в сухом состоянии): *прочные* (80 МПа и выше), *средней прочности* (40...80 МПа) и *низкопрочные* (до 40 МПа).

По обрабатываемости облицовочные камни делятся на классы в зависимости от вида конкретного технологического процесса; по долговечности — на четыре класса: *весьма долговечные* — с началом разрушения через 650 лет; *долговечные* — 220...350 лет; *относительно долговечные* — 75...120 лет; *недолговечные облицовочные камни* — 20...75 лет. По декоративности камни делятся на четыре класса — *высокодекоративные, декоративные, малодекоративные и недекоративные* — в зависимости от суммарной оценки декоративности, определяемой по балльной системе.

В зависимости от назначения различают каменные плиты, идущие на облицовку гидротехнических сооружений, наружную облицовку зданий,

специальную облицовку для защиты от коррозии, цокольные плиты и плиты для полов и ступеней.

Для облицовки гидротехнических сооружений, набережных, устоев мостов, цокольной части монументальных сооружений применяют камни и плиты из гранита и других изверженных пород, которым свойственны высокая морозостойкость, прочность и твердость. Плиты для наружной облицовки зданий делаются из атмосферостойких осадочных пород (известняков, доломитов, песчаников, туфов), которые легче поддаются обработке и экономичнее гранитных пород. Для внутренней облицовки общественных зданий (например, станций метрополитена) широко используют такие породы, как мрамор, ангидрит, гипс.

Цокольные плиты, а также детали карнизов и других выступающих частей здания изготавливают из стойких пород (истираемость не более $2,2 \text{ г/см}^2$ при слабом движении и не более $0,48 \text{ г/см}^2$ при интенсивном движении людских потоков). Эти изделия не должны иметь волосных трещин, а форма должна быть такой, чтобы на них не задерживалась вода от дождя и тающего снега.

Фактура лицевой поверхности может быть самой разнообразной:

- *зеркальной* — обработка плотных горных пород полировочным порошком с накаткой глянца;
- *лощенной* — обработка шлифовальным порошком без накатки глянца;
- *шлифованной* — шлифование абразивными инструментами;
- *пиленной* — распиливание на канатных пилах или на распиловочных станках: *точечная, бороздчатая и рифленая фактуры, фактура «скала».*

Дорожные каменные материалы. Такими материалами являются *бортовые камни, брусчатка (брусчатый камень), колотый или булыжный камень и тротуарные плиты.* Их получают из изверженных и осадочных горных пород. Горные породы не должны быть затронуты выветриванием.

Изверженные горные породы должны обладать следующими свойствами: пределом прочности при сжатии глубинных горных пород — не менее 100 МПа, излившихся — не менее 60 МПа, коэффициентом размягчения — не менее 0,9, водопоглощением — не более 1,0%, морозостойкостью — не менее F 25, сопротивлением удару — не менее 150 Па, плотностью — 2300 кг/м^3 и более.

Осадочные горные породы должны иметь плотность 2100 кг/м^3 , коэффициент размягчения — не менее 0,75, водопоглощение — не более 4%, морозостойкость — не менее F 25 и сопротивление удару — 150 Па.

Бортовые камни — дорожный каменный материал в виде бруса длиной 70...200 см из прочных изверженных горных пород (диабазы, базальта, гранита и др.), отличающихся высокими показателями морозо-

и износостойкости и прочности. По форме они представляет собой брус с наклонной или вертикальной лицевой гранью в поперечном сечении. Верхняя часть бортового камня, выступающая над дорожным покрытием, обтесана чисто, нижняя — грубо.

Бортовые камни изготавливают *прямыми и лекальными, высокими* (до 40 см) и *низкими* (до 30 см).

Бортовые камни используются вместо бетонных изделий, отделяющих проезжую часть дороги от тротуара, при соответствующем технико-экономическом обосновании.

Брусчатка — дорожный каменный материал в виде брусков (длина 15...25, ширина 12...15, высота 10...16 см) из прочных изверженных горных пород (диабаз, базальта, гранита и др.). Для мощения дорог брусчатку изготавливают из однородных мелко- и среднезернистых пород (диабаз и др.). Предел прочности при сжатии исходной породы — не ниже 100 МПа, водопоглощение — не более 0,6%.

Предел прочности на сжатие для брусчатки из изверженных пород — не ниже 100 МПа, морозостойкость — F 100.

Брусчатый камень должен иметь форму усеченной пирамиды с параллельными верхним и нижним основаниями, перпендикулярными оси. Брусчатка подразделяется на *высокую* (высотой 160 мм), *среднюю* (130 мм) и *низкую* (100 мм). Высокая и средняя брусчатка предназначена для укладки на песчаные грунты, низкая — на бетонное или другие виды прочных оснований.

Разновидностями брусчатки являются *шашки для мозаичной мостовой* и *шашки для мощения*. Шашка для мозаичной мостовой приближается по форме к кубу со стороной 70...110 мм, а шашка для мощения — к усеченной пирамиде.

Колотый и булыжный камни — дорожный каменный материал, по форме близкий к многогранной призме (колотый) или оваловиду (булыжный) с площадью лицевой поверхности 100, 200 и 400 см² и высотой соответственно 16, 20 и 30 см из прочных изверженных горных пород.

Лицевая поверхность и постель должны быть параллельны; на боковых гранях не должно быть выступов, препятствующих плотному примыканию к другому камню.

Колотый и булыжный камни используют для укрепления откосов земляных покрытий и оснований.

Тротуарные плиты — дорожный каменный материал в виде прямоугольных или квадратных плит из гнейсов и подобных ему слоистых горных пород. Лицевая поверхность этих плит должна быть ровной, размеры сторон — от 20 до 80 см, толщина — не менее 4 и не более 15 см.

4.1.1.3. Грубообработанные каменные материалы

Бутовый камень — разновидность грубообработанного каменного материала в виде крупных обломков горных пород размером в поперечнике 15...50 см, получаемых при разработке (обычно взрывным способом) преимущественно известняков, доломитов, песчаников.

Разработку бутового камня проводят из плотных местных осадочных, изверженных и метаморфических горных пород, отвечающих проектным требованиям в отношении прочности, морозостойкости (не ниже F 15) и водостойкости (коэффициент размягчения не менее 0,7). Бутовый камень из осадочных пород (известняков, доломитов, песчаников) не должен содержать примесей глины, рыхлых пород и включений пирита.

Бутовый камень по форме бывает *рваный*, *постелистый* и *лещадный* с шириной, в 3 раза и более превышающей толщину. Его используют для возведения плотин и других гидротехнических сооружений, подпорных стенок, кладки фундаментов и перерабатывают на щебень. Для кладки фундаментов и подземных стен применяют однородный камень, не имеющий следов выветривания, прослоек глины, а также расслоений и трещин.

Гравий — рыхлый грубообработанный каменный материал, образовавшийся в результате естественного разрушения (выветривания) осадочных горных пород и состоящий из достаточно окатанных зерен размером 1...10 мм (в горном деле выделяют гравий размером 5...70 мм).

Гравий получают просеиванием рыхлых осадочных пород, в необходимых случаях применяя промывку для удаления вредных примесей (глины, пыли). В гравии допускается не более 1% (по массе) глинистых, илистых и пылевидных примесей.

Гравий обычно содержит примеси пыли, глины, иногда и органических веществ, а также песка. При большом содержании песка (25...40%) такой материал называют *песчано-гравийной смесью*.

Крупность гравия определяют, просеивая его через стандартный набор сит с круглыми отверстиями размером 70, 40, 20, 10 и 5 (или 3) мм.

Свойства гравия (объемная и насыпная масса, водопоглощение, прочность по дробимости в цилиндре, содержание слабых зерен, износ в барабане, морозостойкость и др.) зависят от слагающих его пород и регламентируются техническими требованиями стандартов на строительные материалы различного назначения: ГОСТ 8269—97, ГОСТ 24100—80, ГОСТ 4.211—80. Прочность зерен гравия должна обеспечивать получение прочности бетона выше заданной на 20...50%. Допустимое количество зерен слабых пород в гравии для бетона марки М 100 и выше не должно превышать 10%.

Гравий подразделяют:

- в зависимости от прочности по дробимости — марки ДР8, ДР12, ДР16 и ДР24;
- по показателю износа в полочном барабане — марки И-I (до 20%), И-II (до 30%), И-III (до 40%) и И-IV (до 50%). Цифра во всех марках по показателю износа указывает максимально допустимый процент потери массы материала после испытания;
- по морозостойкости — марки F 15, F 25, F50, F 100, F 150, F 200 и F 300. Морозостойкость требуется от гравия только в том случае, если он предназначается для бетонных сооружений, подвергающихся замораживанию и оттаиванию. В суровых климатических условиях требуется, чтобы гравий выдерживал не менее 100...200 циклов замораживания и оттаивания, в умеренных условиях — 50 циклов, в мягких условиях — 15...20 циклов.

Гравий природного происхождения применяют в качестве крупного заполнителя для армированного и неармированного бетона, для приготовления гравийно-щебеночной смеси, используемой при сооружении железнодорожного пути, в строительстве автомобильных дорог и др. Гравий рекомендуется применять для бетонов марки до 300.

Для изготовления бетонной смеси желателен в основном крупный гравий, но с достаточным содержанием средних и мелких зерен (рис. 67). Пустотность в гравии не должна превышать*45%. Для бетонирования массивных сооружений с редкой арматурой можно использовать гравий, наибольшая крупность которого достигает 120...150 мм.

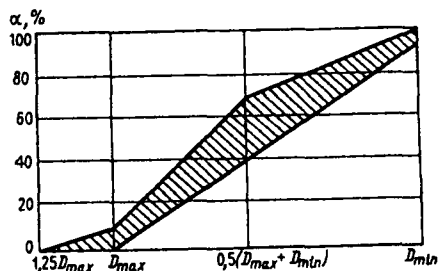
Существенное значение имеет форма зерен гравия. Наиболее выгодна малоокатанная (*щебневидная*) форма зерен, менее выгодна — *яйцевидная* (окатанная), еще менее — *пластинчатая* (или *лещадная*) с шириной, в 3 раза и более превышающей толщину, и *игловатая*, длиной, в 3 раза и более превышающей толщину и ширину. Игловатых и пластинчатых зерен в составе гравия для бетона должно быть не более 15% (по массе).

Влажность гравия (за вычетом воды, поглощенной зернами) должна учитываться при определении количества воды, добавляемой в бетонную смесь. На изменение объема гравия влажность не влияет.

Щебнем из природного камня называется грубообработанный каменный материал, полученный в результате дробления камней из горных пород, морозостойких и имеющих предел прочности на сжатие 120...120 МПа, на куски размером 5...70 мм (для гидротехнического строительства — до 150 мм).

Щебень дробят из гранита, диабазы и других изверженных пород, а также из плотных осадочных пород — известняка, доломита и измененных пород — кварцита. Встречается и природный щебень, называемый *дресвой*.

Рис. 67. График зернового состава гравия и щебня



Куски щебня, как правило, имеют остроугольную форму. Лучшими с точки зрения применения считаются куски, форма которых близка к кубу или тетраэдру; куски плоской формы значительно хуже, так как они легко ломаются.

Форма кусков щебня зависит от структуры горной породы и типа камнедробильной машины.

Среднее значение коэффициента формы зерен щебня или гравия (отношение наибольшего размера зерна к его наименьшему размеру) для высококачественного бетонного заполнителя равно 1,5...2 и не более 2,5.

К крупности, зерновому составу (см. рис. 67), прочности и морозостойкости щебня предъявляют те же требования, что и к гравию. Щебень чище гравия, обычно он не содержит органических примесей.

Щебень имеет следующие марки: 200, 300, 400, 600, 1000, 1200, 1400. При этом щебень высшей категории качества из изверженных и метаморфических горных пород должен иметь марку не ниже М800, из осадочных карбонатных пород — не ниже М600. Щебень марок по прочности 1400, 1200 и 1000 не должен содержать зерен слабых пород более 5% по массе, а марок 800, 600 и 400 — не более 10% и 300 и 200 — не более 15% по массе.

Песок — зерна различных минералов (кварца, полевого шпата, слюды и др.) размером 0,14...5 мм.

В промышленности используют *природные* (естественные и обогащенные) и *искусственные пески*. Природные пески образуются в результате естественного разрушения массивных горных пород и в зависимости от их происхождения и условий залегания разделяются на горные (овражные), речные и морские, а по минералогическому составу — на кварцевые, полевошпатовые, известняковые, доломитовые. Искусственные пески изготавливают путем дробления твердых горных пород, и эти пески стоят значительно дороже. Наиболее широко используются кварцевые пески.

Кварцевые пески могут быть разделены на две основные группы: *пески массового использования* и *пески узкого назначения*. К первой группе относятся пески, применяемые для изготовления бетонов и строительных растворов, в производстве силикатных строительных материалов, при изготовлении изделий грубой керамики, кровельных рулонных

материалов, в цементном производстве и т.д. Пески второй группы используются в литейном производстве (формовочные пески), в производстве огнеупоров, фарфорофаянса, стекла, как абразивный материал, для фильтрации воды и др. Потребительские свойства песков второй группы определены более жестко и устанавливаются, например, ГОСТ 2138—91 «Пески формовочные» и др.

Строительные пески — наиболее крупная функциональная группа природных и искусственных песков, используемых для всех видов бетонов и строительных растворов, а также для устройства дорог и других строительных работ. В зависимости от назначения они должны отвечать требованиям ГОСТ 8736—93, относящимся к строительным нормативам; требованиям ГОСТ 24100—80, относящимся к сырью для получения строительных песков, а также требованиям ГОСТ 22756—77 на песок декоративный.

Песку для строительных работ должна быть дана радиационно-гигиеническая оценка, по результатам которой устанавливают область его применения. В зависимости от значений удельной эффективной активности естественных радионуклидов ($A_{эф}$) его применяют:

- во вновь строящихся жилых и общественных зданиях (370 Бк/кг);
- для дорожного строительства в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных зданий и сооружений (370...740 Бк/кг);
- в дорожном строительстве вне населенных пунктов (740...2800 Бк/кг).

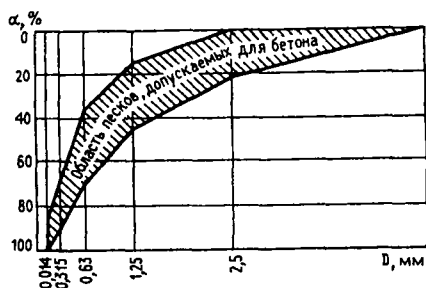
Нормальным песком для строительных работ считается кварцевый песок (ГОСТ 6139—91) с зернами 0,5...0,9 мм. К песку из пористых природных горных пород (ГОСТ 22263—76) относят песок с насыпной плотностью не более 1400 кг/м³. Пористые пески могут быть вулканического или осадочного происхождения. К искусственным пористым пескам относятся керамзитовый; песок из шлаковой пемзы; аглопоритовый; перлитовый (ГОСТ 10832—91) и вермикулитовый (ГОСТ 12865—67).

Для приготовления обычного бетона песок должен отвечать следующим требованиям:

- а) содержание зерен, проходящих через сито 0,14 мм, не должно превышать 10% (по массе). Наличие зерен крупнее 10 мм не допускается; зерен размером 5...10 мм должно быть не более 5% по массе;
- б) содержание глинистых, илистых и пылевидных примесей не должно превышать 3% по массе. Наиболее вредна примесь глины, обволакивающей зерна песка, так как она препятствует сцеплению с цементным камнем. От этой глины песок можно освободить только тщательной промывкой;
- в) органические примеси (гумусовые и др.) допускаются только в самом небольшом количестве, так как они понижают прочность цемента (более чем на 25%) и даже разрушают его.

Рис. 68. График зернового состава песка

Крупность зерен определяют просеиванием песка через стандартный набор сит. Сита имеют отверстия в свету: 2,5; 1,25; 0,63; 0,315 и 0,16 мм, т.е. размер их уменьшается примерно в геометрической прогрессии. Результаты просеивания удобно представлять графически, если по горизонтали отложить размеры отверстий сит, а по вертикали — полные остатки на ситах в процентах. На графике (рис. 68) в виде заштрихованной полосы указаны допустимые пределы колебаний зернового состава песка для бетона.



Для условного выражения крупности песка применяют особый термин — *модуль крупности* M_k , обозначающий сумму полных остатков (в процентах на ситах стандартного набора), деленную на 100. По величине модуля крупности пески, пригодные для бетона, разделяются следующим образом: $M_k = 3,5 \dots 2,5$ — крупный; $M_k = 2,5 \dots 2$ — средний; $M_k = 2 \dots 1,5$ — мелкий.

Полная характеристика песка для бетона по крупности может быть дана только с учетом пустотности. При наилучшем сочетании в песке крупных, средних и мелких зерен пустотность может уменьшаться до 30%. В хорошем песке пустотность не должна превышать 38%.

Для бетона наиболее пригоден в основном крупный песок, содержащий достаточное количество средних и мелких зерен. При такой комбинации зерен объем пустот будет малым и площадь поверхности зерен, которая определяет расход цемента, небольшая. Этот оптимальный состав песка соответствует заштрихованной полосе на рис. 68.

Плотность песка зависит от его истинной плотности, пустотности, влажности и определяется в сухом рыхлом состоянии, называемом стандартным. Песок, предназначенный для бетона марок М200 и выше или бетона в конструкциях, подвергающихся замерзанию в насыщенном водой состоянии, должен иметь плотность не ниже 1550 кг/м^3 ; в остальных, более простых случаях — не ниже 1400 кг/м^3 .

При встряхивании плотность песка может увеличиваться до $1600 \dots 1700 \text{ кг/м}^3$. Самый большой объем песок занимает при влажности около 5...7%; с повышением или понижением влажности объем песка уменьшается. Эти свойства должны учитываться при приемке и дозировке (по объему) песка для приготовления бетона.

Общие сведения о пористых заполнителях. Пористые заполнители по происхождению могут быть *органическими* и *неоргани-*

ческими. В качестве органических заполнителей используют древесину, стебли хлопчатника, гранулы пенополистирола и др. Неорганические пористые заполнители подразделяются на *природные* и *искусственные*. Природные получают путем частичного дробления и рассева или только рассева пористых горных пород (пемзы, вулканического туфа, известняка-ракушечника и др.). Искусственные заполнители являются продуктами термической обработки минерального сырья и разделяются на *специально изготовленные* (керамзитовые гравий и песок, шлаковая пемза, гранулированный металлургический шлак, вспученные перлит и вермикулит, топливные отходы, аглопорит, шунгезит, вспученный азурит и др.) и *побочные продукты промышленности* (топливные шлаки и золы).

Пористые заполнители делят на *крупные* (пористый гравий и щебень) с размером зерен 5...40 мм и насыпной плотностью не более 1200 кг/м³ и *мелкие* (пористый песок), состоящие из частиц менее 5 мм с насыпной плотностью не более 1000 кг/м³.

По насыпной плотности в сухом состоянии (кг/м³) пористые заполнители разделяют на марки: 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 и 1200.

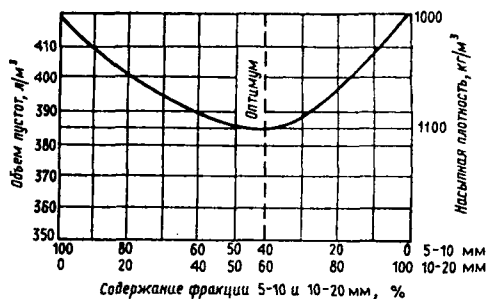
Требования к зерновому составу пористого песка установлены в зависимости от того, для какого вида бетона он готовится. Лучшее сочетание показателей плотности, теплопроводности, прочности и расхода цемента для легких бетонов достигается при наибольшем насыщении бетона пористым заполнителем. Оптимальный зерновой состав соответствует минимальной пустотности смеси зерен (рис. 69).

Зерна большинства пористых заполнителей имеют шероховатую поверхность и поглощают некоторое количество воды затворения, поэтому легкобетонные смеси нуждаются в принудительном смешивании и интенсивном уплотнении (вибрировании под нагрузкой, вибропрокате, вибротромбовании и др.), которое более эффективно при применении пластифицирующих добавок.

Содержание водорастворимых сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO₃ в пористом песке, применяемом для армированных легких бетонов, допускается не более 1% по массе.

Аглопоритовый песок — высококачественный пористый заполнитель, получаемый агломерацией глинистых и песчано-глинистых пород, кремнистых опаловых пород, а также золы и шлаков ТЭЦ, отходов добычи угля и горючих сланцев. По насыпной плотности аглопоритовый песок подразделяется на четыре марки: 600 (насыпная плотность до 600 кг/м³), 700 (600...700 кг/м³), 800 (701...800 кг/м³), 1000 (901...1000 кг/м³) и 1100 (1001...1100 кг/м³). В зависимости от размера зерен аглопоритовый песок делится на фракции: *рядовой* — с зернами любых размеров; *крупный* — с зернами размером 1,25...5 мм; *мелкий* — с зернами размером до 1,25 мм. Предел прочности аглопоритового песка 0,4...1,5 МПа.

Рис. 69. Изменение величины межзерновой пустотности и насыпной плотности керамзитового гравия в зависимости от его зернового состава



Агломерация — термический способ окускования спеканием мелких материалов.

Вспученный перлит (ГОСТ 10832—91) — пористый песок (зерна до 5 мм), получаемый при термической обработке (900...1200°C) дробленых вулканических стекол, содержащих связанную воду. Плотность 75...250 кг/м³, теплопроводность 0,04...0,071 Вт/(м·К), истинная пористость — до 85...90%, а количество открытых пор 3...20%. Применяют в растворах и бетонах, идущих для приготовления теплоизоляционных изделий, огнезащитных штукатурок, а также для теплоизоляционных засыпок при температурах изолируемых поверхностей от -200 до +800°C.

Керамзитовые гравий и песок — материалы округлой формы, получаемые из глин путем вспучивания газами, выделяющимися из них при нагреве до пиропластического состояния. Керамзитовый гравий выпускают прочностью 0,6...6 МПа, насыпной плотностью 150...800 кг/м³, средней прочностью 2,6 МПа. Керамзитовый песок может быть получен рассевом керамзита и дроблением с рассевом керамзитового гравия. В последнем случае он имеет серый цвет, близкий к черному.

Вспученный вермикулит (ГОСТ 12865—67) — смесь пластинчатых (чешуйчатых) зерен слюды крупностью не более 15 мм, получаемая ускоренным обжигом до вспучивания горной породы вермикулита из группы гидрослюд. Плотность 100...300 кг/м³, теплопроводность при температуре до 100°C составляет 0,048...0,10 Вт/(м·К). Водопоглощение — до 300% по массе. При нагревании до 1100°C начинает разрушаться, а при 1300°C плавится. Применяется в качестве теплоизоляционной засыпки при температуре изолируемых поверхностей до 900°C, а также в качестве заполнителя для легких бетонов и для приготовления штукатурных огнезащитных, теплоизоляционных и звукопоглощающих растворов.

Термозит — ячеистый материал, получаемый в результате искусственного вспучивания расплавленного шлака при быстром его охлаждении. Насыпная плотность термозита 300...1100 кг/м³. Щебень из термозита является хорошим заполнителем для легких термозитобетонов.

4.1.2. Минеральные неорганические вяжущие вещества и материалы на их основе

Минеральными неорганическими вяжущими веществами называют порошкообразные вещества минерального происхождения, которые при смешивании с водой образуют пластично-вязкое тесто, способное со временем самопроизвольно твердеть в результате физико-химических процессов.

Цемент — собирательное название минеральных неорганических порошкообразных вяжущих веществ, способных при смешивании с водой (иногда с водными растворами солей) образовывать пластичное тесто (*цементное тесто*), приобретающее затем камневидное состояние, т.е. превращающееся в *цементный камень*.

Цементное тесто представляет собой концентрированную водную суспензию, обладающую характерными свойствами структурированных дисперсных систем: прочностью структуры, пластической вязкостью, тиксотропией. В цементном тесте твердые частицы суспензии связаны вандерваальсовыми силами и сцеплены вследствие переплетения покрывающих их гидратных оболочек. Структура цементного теста разрушается при механических воздействиях (перемешивании, вибраровании и т.п.), но после прекращения воздействий структурные связи в системе вновь восстанавливаются. При твердении объем теста большинства вяжущих материалов изменяется: цементного, известкового — уменьшается; гипсового — увеличивается. Исключения составляют специальные расширяющиеся и безусадочные цементы.

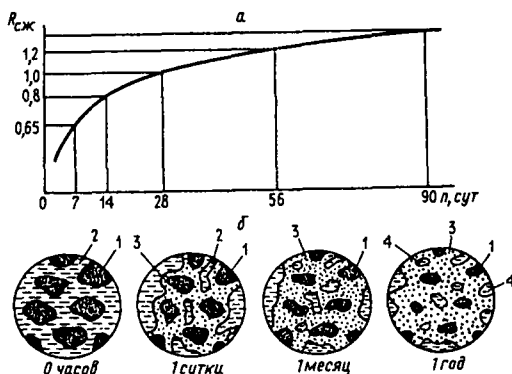
Цементное тесто в начале смешения (*затворения*) в течение 1...3 ч пластично и легко формуется. Потом (через 5...10 ч) наступает схватывание, и цементное тесто загустевает, утрачивая подвижность, но его механическая прочность невелика. Переход теста в твердое состояние означает конец схватывания и начало твердения, которое характеризуется возрастанием прочности. Твердение при благоприятных условиях длится годами — вплоть до полной гидратации цемента. К концу периода схватывания формируется основная структура цементного теста, которое затем превращается в цементный камень. Этапы твердения цемента схематически представлены на рис. 70.

Термин *гидратация* объединяет процессы взаимодействия цемента с водой, происходящие при его схватывании и твердении.

Цементный камень после твердения представляет собой микроскопически неоднородную систему, состоящую из кристаллических сростков, гелеобразных масс, зерен цемента, не полностью прореагировавших с водой, и пор. Структурными составляющими цементного камня являются:

Рис. 70. Твердение цемента:

а — рост прочности цемента ($R_{сж}$) во времени; *б* — схема взаимодействия зерен цемента с водой в различные сроки затвердевания (1 — зерно цемента; 2 — вода; 3 — гидратные новообразования; 4 — воздушные поры)



1) продукты гидратации цемента — гель гидросиликата кальция и другие новообразования, обладающие свойствами коллоидов, а также относительно крупные кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и этtringита;

2) непрореагировавшие зерна клинкера, содержание которых уменьшается по мере гидратации цемента;

3) поры — поры геля (менее 0,1 мкм); капиллярные поры (от 0,1 до 10 мкм), расположенные между агрегатами частиц геля; воздушные поры (от 50 мкм до 2 мм), заполненные воздухом, всосанным вследствие наличия вакуума, вызванного *контракцией*, либо вовлеченным при добавлении специальных воздухововлекающих веществ, повышающих морозостойкость;

4) вода, характеризующаяся тремя формами связи — химической, физико-химической (адсорбция), физико-механической (капиллярной).

Клинкер — зернистый материал, получаемый обжигом до спекания при 1450°C минеральной смеси, состоящей в основном из карбоната кальция (различных видов известняка) и алюмосиликатов (глин, мергеля, доменного шлака и др.).

Контракция (стяжение) — явление уменьшения абсолютного объема системы «цемент + вода» в процессе гидратации.

Упрощенная модель геля $\text{C} - \text{S} - \text{H}$ изображена на рис. 71. Пористая структура геля как самого важного продукта гидратации цемента оказывает влияние на механические свойства, проницаемость и морозостойкость цементного камня. Гелеподобная масса пронизана относительно крупными кристаллами $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Ее наличие предопределяет специфические свойства цементного камня: усадку при твердении на воздухе, набухание в воде, особенности работы под нагрузкой и др.

Этtringит ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) присутствует в цементном камне в виде длинных игловидных кристаллов. Эти кристаллы и обуславливают раннюю прочность затвердевающего цемента. Заполняя поры цементного камня, этtringит при оптимальной дозировке гипса повышает его механическую прочность.

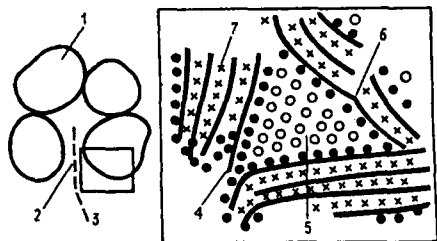


Рис. 71. Упрощенная модель геля $C-S-H$ (по Кондо и Даймону):

1 — частица геля; 2, 4 — узкий проход; 3 — пора между частицами геля; 5 — внутрикристаллитная пора; 6 — междуслойная вода; 7 — межкристаллитная пора

Цементный камень, являющийся минеральным клеем, скрепляющим зерна заполнителя, должен обладать достаточной собственной прочностью и адгезией, т.е. хорошо сцепляться (срастаться) с зернами заполнителя. Эти свойства цементного камня зависят от качества и количества новообразований при гидратации, объема и характера пор. Прочность цементного камня и скорость его твердения зависят от минералогического состава клинкера, тонкости помола цемента, содержания воды, влажности, температуры среды и продолжительности хранения. Проницаемость цементного камня определяется его пористостью и наличием трещин.

Основным потребительским свойством неорганических вяжущих веществ является возможность при переходе из тестообразного в камневидное состояние скреплять между собой камни, зерна песка, гравия, щебня. Это свойство неорганических вяжущих веществ используют для изготовления бетонов, силикатного кирпича, асбоцементных и других необожженных искусственных материалов и строительных растворов (кладочных, штукатурных и специальных).

При строительстве зданий и сооружений необходимо учитывать возможность коррозии цементного камня в бетоне, стойкость которого ниже стойкости плотных каменных заполнителей, и применять меры защиты: 1) выбор цемента, отвечающего условиям эксплуатации; 2) введение в бетонную смесь химических добавок; 3) применение особо плотного бетона; 4) специальная пропитка и защитные покрытия.

Неорганические вяжущие вещества по способу твердения делятся на *воздушные, гидравлические и автоклавного твердения*. Воздушные вяжущие вещества способны затвердевать и длительное время сохранять прочность только на воздухе, гидравлические твердеют и длительное время сохраняют прочность (или даже повышают ее) не только на воздухе, но и в воде, а вяжущие автоклавного твердения — способны затвердевать при автоклавном синтезе, происходящем в среде насыщенного водяного пара.

4.1.2.1. Воздушные минеральные неорганические вяжущие вещества

По химическому составу воздушные минеральные неорганические вяжущие вещества делятся на четыре группы:

- 1) *известковые*, состоящие главным образом из оксида кальция CaO ;
- 2) *магнезиальные*, содержащие каустический магнезит MgO ;
- 3) *гипсовые*, основой которых является сульфат кальция;
- 4) *жидкое стекло* — силикат натрия или калия (в виде водного раствора).

Известковые вяжущие вещества более широко известны как *воздушная* (или *строительная*) *известь*.

Воздушная известь (ГОСТ 9179—77) — воздушное минеральное неорганическое вяжущее вещество, получаемое при умеренном *обжиге* ($900\ldots 1200^\circ\text{C}$) кальциево-магнелиевых карбонатных горных пород (мела, известняка, доломитизированного известняка и доломита) с содержанием глины не более 6% до возможно более полного удаления CO_2 по реакции $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$.

Обжиг — нагрев и выдержка при высокой температуре (в обжиговых печах) различных материалов для придания им необходимых свойств или удаления примесей

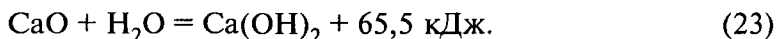
Воздушная известь отличается от других вяжущих веществ тем, что превращается в тонкий порошок при помоле (*молотая негашеная известь*), а также путем гашения водой (*гидратная известь*). Таким образом, воздушная известь в зависимости от способа использования может затвердевать и воздушным, и гидравлическим способами.

Молотую негашеную известь получают путем обжига кальциево-магнелиевых карбонатных пород с последующим тонким помолом комовой извести без предварительного гашения.

Молотая негашеная известь (ГОСТ 9179—77) измельчается до тонкости, при которой остаток при просеивании пробы через сита № 02 и 008 должен быть, соответственно, не более 1,5 и 15%, что примерно соответствует удельной поверхности $3500\ldots 5000 \text{ см}^2/\text{г}$. Известь используют сразу после помола без предварительного гашения, так как вследствие поглощения влаги из воздуха она теряет свои вяжущие свойства. Для ускорения твердения растворных и бетонных смесей на молотой негашеной извести в их состав вводят хлористый кальций, а для замедления твердения в начальный период — гипс, серную кислоту и др. Изделия из этой извести имеют большие плотность, прочность и водостойкость.

При работах с молотой негашеной известью необходимо соблюдать требования по охране труда. Попадание частиц молотой извести в легкие, а также на слизистые оболочки, особенно глаз, опасно.

Гидратная известь получается путем гашения водой воздушной извести. Процесс гашения заключается в гидратации оксида кальция под действием воды:



Практически для гашения берут воды в 2—3 раза больше, чем следует по реакции (23), так как часть воды теряется в виде пара. В зависимости от количества добавляемой воды можно получить известковое тесто, известковое молоко или гидратную известь в виде порошка (*пушонка*).

На скорость гашения извести оказывают влияние температура и размеры кусков комовой извести. С повышением температуры процесс гашения ускоряется. В зависимости от скорости гашения различают известь *быстро-*, *средне-* и *медленно гасящуюся* со скоростями гашения, соответственно, до 8, до 25 и не менее 25 мин.

Твердение извести может происходить только в воздушно-сухих условиях, так как оно является следствием высыхания и образования кристаллического сростка Ca(OH)_2 , а также процесса образования углекислого кальция на поверхности изделия. Все виды извести имеют кристаллическое строение, но размеры кристаллов и расстояние между ними меняются в широких пределах.

Воздушная известь применяется в виде строительных растворов, т.е. в смеси с песком и другими заполнителями. Громадная удельная поверхность частиц Ca(OH)_2 обуславливает большую водоудерживающую способность и пластичность известкового теста, поскольку каждая такая частица в известковом тесте окружена тонким слоем адсорбированной воды, играющей роль своеобразной гидродинамической смазки. Высокая пластичность известкового теста в смеси с песком — это свойство, которое более всего ценится при изготовлении *строительных растворов*.

Строительные растворы на воздушной извести имеют невысокую прочность. Так, известковые растворы через 28 суток воздушного твердения имеют прочность при сжатии: на гашеной извести — 0,4...1 МПа, на молотой негашеной извести — до 5 МПа. Поэтому сорт воздушной извести устанавливают не по прочности, а по характеристикам ее состава.

Воздушная известь с номенклатурой показателей качества по ГОСТ 4.207—79 применяется для изготовления искусственных каменных материалов — силикатного кирпича, силикатных бетонов (ячеистых, легких, тяжелых, силикатных и пеносиликатных изделий), а также используется в смешанных вяжущих и покрасочных составах.

Магнезиальные вяжущие вещества — каустические магнезит и доломит (ГОСТ 1216—87), представляющие собой тонкие порошки, получаемого в результате умеренного обжига (650...850°C) магнезита или доломита с последующим их помолом. Плотность каустического магнезита 3100...3400 кг/м³, а доломита — 2800...2850 кг/м³.

Магнезиальное вяжущее вещество чаще всего смешивают с водным раствором хлорида магния. Это ускоряет твердение и значительно повышает прочность. При смешивании с водой оксид магния гидратируется очень медленно. Такое вяжущее вещество отличается высокой проч-

ностью, достигающей при сжатии 60...100 МПа, хорошо сцепляется с деревом, поэтому его можно применять для изготовления фибролита и магнезиально-опилочных (ксилолитовых) полов — монолитных и плиточных. Раньше оно использовалось при производстве ксилолита (смеси вяжущего вещества с опилками), фибролита и других теплоизоляционных материалов, в настоящее время его применение резко сократилось.

Гипсовые вяжущие вещества — воздушные минеральные неорганические вяжущие вещества, состоящие в основном из полуводного гипса или ангидрита и полученные путем тепловой обработки сырья с последующим помолом.

Сырьем чаще всего служит горная порода — гипс, который состоит преимущественно из минерала гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Используют также ангидрит CaSO_4 , отходы промышленности (фосфогипс — от переработки природных фосфатов в суперфосфат, борогипс и др.).

Основные свойства гипсовых вяжущих веществ (ГОСТ 125—79): *тонкость помола, водопотребность, сроки схватывания, прочность при сжатии*, определяющая марку.

По тонкости помола (при просеивании на сите с ячейками 0,2 мм) установлены три степени помола, обозначаемые, соответственно, I (*грубый*), II (*средний*) и III (*тонкий*).

В зависимости от сроков схватывания гипсового теста стандартной консистенции выпускают следующие виды гипсовых вяжущих веществ: А — с началом схватывания не ранее чем через 2 мин и концом не позднее чем через 15 мин; Б — с началом схватывания не ранее чем через 6 мин и концом — 30 мин; В — начало схватывания не ранее чем через 30 мин (конец не нормируется).

Прочностные характеристики гипсовых вяжущих веществ: предел прочности при сжатии 2...25 МПа; предел прочности на изгиб 1,2...8 МПа. В воде их прочность снижается вследствие растворения $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и разрушения кристаллического сростка. Для повышения водостойкости гипсовых изделий при изготовлении вводят гидрофобные добавки, молотый, доменный гранулированный шлак, а также пропитывают водоотталкивающими составами.

В зависимости от температуры тепловой обработки гипсовые вяжущие вещества подразделяют на две группы: *низко-* и *высокообжиговые*.

Низкообжиговые получают тепловой обработкой природного гипса при низких температурах (110...160°C). К ним относятся строительный, формовочный (формы в керамической и фарфорофаянсовой промышленности) и высокопрочный гипс.

Высокообжиговые изготавливают путем обжига гипсового камня при высокой температуре (600...900°C). Высокообжиговый гипс, в отличие от строительного, медленно схватывается и твердеет, но его прочность на сжатие выше (10...20 МПа). Его применяют для приготовления кладочных и отде-

лочных растворов при устройстве бесшовных полов, бетонов, производства теплоизоляционных материалов, искусственного мрамора и других декоративных изделий. К высокообжиговым гипсовым вяжущим веществам относятся *ангидритовый цемент* и *эстрих-гипс*.

Ангидритовый цемент — медленно схватывающееся вяжущее вещество с началом схватывания не ранее 30 мин, концом — не позднее 24 ч. Состав ангидритового цемента: известь — 2...5%; бисульфат или сульфат натрия с железным или медным купоросом — по 0,5...1% каждого; доломит, обожженный при 800...900°C, — 3...8%; основной гранулированный доменный шлак — 10...15%. Марки ангидритового цемента по прочности при сжатии — М50, М100, М150 и М200.

Эстрих-гипс — разновидность ангидритовых цементов — получают обжигом природного гипса или ангидрита при температурах 800...1000°C с последующим тонким помолом.

Номенклатура показателей качества гипсовых вяжущих веществ установлена в ГОСТ 4.204—79.

В зависимости от предела прочности на сжатие различают следующие марки гипсовых вяжущих веществ: Г-2, ..., Г-7, Г-10, Г-13, Г-16, Г-19, Г-22, Г-25. В маркировке может быть дана дополнительная информация об основных свойствах. Например, Г-5-А-II обозначает: гипсовое вяжущее вещества марки 5 (предел прочности при сжатии 5 МПа), быстротвердеющее, среднего помола.

Жидкое стекло представляет собой коллоидный водный раствор силиката натрия (ГОСТ 13078—81) или силиката калия, имеющий плотность 1300...1500 кг/м³ при содержании воды 50...70%. Жидкое стекло получают, растворяя раздробленные куски силикат-глыбы в воде при повышенной температуре и давлении 0,6...0,7 МПа.

Состав щелочных силикатов выражается формулой $R_2O \cdot mSiO_2$, где R — Na или K; *m* — модуль жидкого стекла (для натриевого стекла — 2,6...3,5; для калиевого — 3...4). Чем больше модуль, тем выше качество жидкого стекла. Для ускорения твердения жидкого стекла к нему добавляют кремнефторид натрия Na_2SiF_6 .

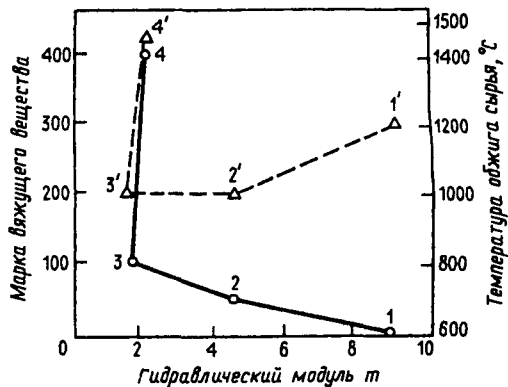
Натриевое стекло используют для изготовления кислотоупорных и жаропрочных бетонов, для уплотнения грунтов. Калиевое стекло, более дорогое, применяют преимущественно в силикатных красках. Нельзя использовать жидкое стекло для конструкций, подверженных длительному воздействию воды, щелочей и фосфорной, фтористо-водородной или кремнефтористо-водородной кислот.

4.1.2.2. Гидравлические минеральные неорганические вяжущие вещества

По химическому составу гидравлические минеральные неорганические вяжущие вещества представляют собой сложную систему, состоящую в основном из соединений четырех оксидов: $CaO - SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3$.

Рис. 72. Зависимость прочности вяжущего вещества (кривая 1—4) от гидравлического модуля m и температуры обжига (кривая 1'—4'):

1, 1' — воздушная известь; 2, 2' — гидравлическая известь; 3, 3' — романцемент; 4, 4' — портландцемент



Эти соединения образуют три основные группы гидравлических минеральных неорганических вяжущих веществ:

- 1) *силикатные цементы*, состоящие преимущественно (на 75%) из силикатов кальция; к ним относятся *портландцемент* и его разновидности — главные вяжущие современного строительства;
- 2) *алюминатные цементы*, вяжущей основой которых являются *глиноземистый цемент* и его разновидности;
- 3) *гидравлическая известь* и *романцемент*.

Содержание в гидравлических минеральных неорганических вяжущих веществах основного оксида CaO по отношению к суммарному количеству кислотных оксидов выражает *гидравлический модуль m* , %:

$$m = \text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3). \quad (24)$$

Для гидравлической извести величина этого модуля колеблется в пределах 1,7...9, при этом значения 1,7...4,5 определяют *сильногидравлическую*, а 4,5...9 — *слабогидравлическую известь*.

Свойства гидравлических вяжущих веществ зависят от их химико-минерального состава, величина гидравлического модуля и температуры обжига сырья (рис. 72).

Добавки для цементов по отношению к свойствам цемента и назначению делят на следующие группы:

- 1) *компоненты вещественного состава* (активные минеральные добавки), определяющие наименование цементов и обладающие гидравлическими свойствами;
- 2) *наполнители*, улучшающие зерновой состав цементов и структуру цементного камня и не обладающие или частично обладающие гидравлическими свойствами;
- 3) *технологические* — *интенсификаторы помола*, регулирующие основные свойства цемента: сроки схватывания, твердение, прочность цемента, пористость цементного камня (*воздухововлекающие добавки*), пластичность цементно-песчаного раствора и бетона (*пластифицирующие*).

щие добавки), водоудерживающую способность, уменьшение смачивания водой поверхности частиц цемента (*гидрофобизирующие добавки*);

4) регулирующие специальные свойства цемента: тепловыделение, объемные деформации, коррозионную стойкость, декоративные свойства и др.

Все гидравлические вяжущие вещества поставляются заводами с гарантиями их свойств, указанными в паспорте. Цемент отгружают навалом или в бумажных пяти- или шестислойных мешках. Для проверки качества отгружаемой продукции поставщик производит испытания свойств цемента, определяя его прочность в возрасте 3 и 28 суток. При транспортировании и хранении цемент необходимо защищать от воздействия влаги и загрязнения. Цементы хранят раздельно по видам и маркам; смешивание разных цементов не допускается.

Портландцемент (ГОСТ 10178—85) — гидравлическое минеральное неорганическое вяжущее вещество, получаемое при тонком измельчении клинкера с добавкой (3...5%) гипса. Вещественный состав цемента характеризует содержание в нем (в % по массе) основных компонентов: клинкера, гипса и активных минеральных добавок. В составе портландцемента преобладают силикаты кальция — 70...80%. Небольшая добавка гипса регулирует сроки схватывания. Суммарное содержание SO_3 в цементе должно быть не менее 1,5 и не более 3,5% (в цементах марок 550 и 600 — до 4%). Допускается введение в цемент при его помоле пластифицирующих и гидрофобизирующих поверхностно-активных добавок в количестве не более 0,3% массы цемента.

Портландцемент по химическому составу выпускается трех видов: Д0 — без добавок, Д5 — с введением до 5% активных минеральных добавок всех видов и Д20, в который разрешается вводить свыше 5%, но не более 20% добавок, в том числе до 10% активных минеральных добавок осадочного происхождения или до 20% доменных и электротермофосфорных гранулированных шлаков и прочих активных минеральных добавок.

Портландцемент — тонкий порошок темно-серого или зеленовато-серого цвета. Тонкость помола оценивается по стандарту путем просеивания предварительно высушенной пробы через сито с сеткой № 008 (размер ячейки в свету 0,08 мм); тонкость помола должна быть такой, чтобы через указанное сито проходило не менее 85% массы просеиваемой пробы. Для оценки дисперсности цемента проводят также определение его удельной поверхности с помощью специального прибора — поверхностемера. Так, для портландцемента марки 400 удельная поверхность составляет обычно 2500...3000 $\text{см}^2/\text{г}$.

Истинная плотность портландцемента (без минеральных добавок) равна 3050...3150 $\text{кг}/\text{м}^3$. Его насыпная плотность зависит от уплотнения

и составляет: для рыхлого цемента — 1100 кг/м^3 , сильно уплотненного — до 1600 кг/м^3 , в среднем — 1300 кг/м^3 .

Портландцемент обладает высокой твердостью после первоначального твердения, высокой конечной прочностью. Он очень чувствителен к агрессивным средам. При его твердении происходит сильное тепловыделение, что позволяет производить бетонирование в зимнее время.

Активность и марку портландцемента определяют испытанием стандартных образцов-призм. *Активностью портландцемента* называют его предел прочности при осевом сжатии половинок балочек, испытанных в возрасте 28 суток. В зависимости от активности портландцементов с учетом предела их прочности при изгибе они подразделяются на марки 400, 500, 550, 600.

К потребительским свойствам портландцементов относят *водопотребность, сроки схватывания, равномерность изменения объема цемента и тепловыделение при твердении*.

Водопотребность цемента определяется количеством воды (% массы цемента), которое необходимо для получения цементного теста нормальной густоты. Начало схватывания цемента должно наступать не ранее чем через 45 мин, а конец — не позднее чем через 10 ч от начала затворения. Замедлителями схватывания портландцемента являются, наряду с гипсом, бура и борная кислота, фосфаты и нитраты калия, натрия и аммония. Ускорителями схватывания — карбонаты и сульфаты металлов, а также органические вещества, например триэтаноламин.

Причиной неравномерного *изменения объема цемента* являются местные деформации, вызываемые расширением свободного CaO и периклаза MgO вследствие их гидратации. Неравномерное изменение объема приводит к возникновению трещин.

Тепловыделение происходит при гидратации цемента; в массивных конструкциях оно вызывает значительные термические напряжения, которые нередко являются причиной появления трещин в бетоне.

Для получения портландцемента с заданными специальными свойствами используют следующие методы:

- регулирование минерального состава и структуры цементного клинкера, оказывающего решающее влияние на потребительские свойства цемента;
- введение минеральных и органических добавок, позволяющих направленно изменять свойства вяжущего вещества, экономить клинкер, уменьшать расход цемента в бетонах;
- оптимизация тонкости помола и зернового состава цемента, влияющих на скорость твердения, активность, тепловыделение и другие свойства цемента.

К специальным видам портландцемента относятся *высокопрочные быстротвердеющий и особо быстротвердеющий* (ГОСТ 969—91), *сульфатостойкие* (ГОСТ 22266—94), *с органическими и минеральными добавками, белые* (ГОСТ 965—89) и *цветные, тампонажные, расширяющиеся и безусадочные* (ГОСТ 11052—74).

Быстротвердеющий портландцемент (БТЦ) — портландцемент с минеральными добавками, отличающийся повышенной прочностью через трое суток твердения. Более интенсивное нарастание прочности в начальный период твердения достигается путем более тонкого помола цемента (удельная поверхность 3500...4000 см²/г), а также повышением содержания трехкальциевых силиката и алюмината (60...65%). Известные марки БТЦ: М400 и М500.

Сульфатостойкий портландцемент — имеет нормированный минералогический состав, отличающийся замедленным твердением в начальные сроки и низким тепловыделением. Выпускается под маркой М400, используют для получения бетонов, работающих в минерализованных и пресных водах.

Пуццолановый портландцемент — получают путем совместного помола клинкера и 25...40% от массы цемента активных минеральных добавок и гипсового камня. Производится выпуск двух марок — М300 и М400. По свойствам они не отличаются от портландцемента.

Белый портландцемент — получают из чистых известняков или мраморов и белых каолиновых глин, а в качестве топлива используют газ или мазут, не загрязняющие клинкер золой. По степени белизны его разделяют на три сорта — I, II и III, а по прочности — на марки М400 и М500. Помол цемента производят более тонкий: остаток на сите с сеткой № 008 должен быть не более 12%. Начало схватывания белого цемента должно наступать не ранее чем через 45 мин, конец — не позднее 12 ч.

Цветные портландцементы — это продукт совместного помола клинкера белого цемента со свето- и щелочестойкими минеральными красителями: охрой, железным суриком, ультрамарином, оксидом хрома, сажей. Производят трех марок: 300, 400 и 500.

Белые и цветные цементы применяют для изготовления цветных бетонов, растворов отделочных смесей и цементных красок.

Тампонажный портландцемент — изготавливают измельчением портландцементного клинкера, гипса с добавками или без них. Без добавок он применяется в условиях нормальных и умеренных температур (15...100°C) и нормальной плотности цементного теста (1650...1950 кг/м³). К тампонажным портландцементам с минеральными или специальными добавками или с совокупностью добавок предъявляются требования по температуре применения, по средней плотности цементного теста и устойчивости тампонажного камня к агрессивности пластовых вод (сульфатная, кислая, углекислая, сероводородная, магнезиальная или полиминеральная).

Шлакортландцементом называют гидравлическое вяжущее вещество, получаемое при совместном измельчении портландцементного клинкера, доменного гранулированного шлака и гипса или путем смешения измель-

ченных тех же компонентов, отдельно. Содержание доменного гранулированного шлака в нем должно составлять от 20 до 80% массы готового продукта.

По пределу прочности при сжатии и изгибе шлакопортландцемент делят на три марки: 300, 400 и 500. Быстротвердеющий шлакопортландцемент М400 должен иметь в трехсуточном возрасте предел прочности при сжатии не менее 20 МПа и на изгиб — не менее 3,5 МПа. Водостойкость бетонов на шлакопортландцементе выше, чем на портландцементе из-за отсутствия свободного гидрата оксида кальция. Шлакопортландцемент в достаточной степени морозо- и воздухостоек, но в меньшей степени, чем портландцемент.

Применяется в гидротехнических сооружениях, а также в конструкциях, находящихся в условиях влажной среды. В конструкциях, подвергающихся частому замораживанию и оттаиванию, увлажнению и высыханию, использовать его нельзя. Быстротвердеющий шлакопортландцемент эффективно применяют в производстве железобетонных изделий, при изготовлении которых требуется тепловлажностная обработка.

Глиноземистый цемент называют быстротвердеющее (но нормально схватывающееся) гидравлическое минеральное неорганическое вяжущее вещество, получаемое при тонком измельчении обожженной до плавления (или спекания) сырьевой смеси бокситов и извести с преобладанием в готовом продукте низкоосновных алюминатов кальция. Главной составной частью глиноземистых цемента является однокальциевый алюминат $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Тонкость помола характеризуется остатком на сите № 008 — его должно быть не более 10% массы пробы.

Глиноземистый цемент является быстротвердеющим, но не быстро схватывающимся вяжущим веществом. Наиболее благоприятными для его твердения являются влажные условия и нормальная температура. Увеличение прочности этого цемента при температуре выше 25°C замедляется. По своим физико-химическим свойствам (скорость твердения, стойкость в различных средах) он превосходит другие вяжущие вещества, в том числе портландцемент. Обладает стойкостью против действия высоких температур (1200...1400°C и выше), что позволяет использовать его для изготовления жаростойких бетонов.

Бетоны на глиноземистом цементе водо-, воздухо- и морозостойки, а также стойки в условиях пресных и сульфатных вод, однако разрушаются в щелочных водах.

Глиноземистый цемент производят трех марок: 400, 500 и 600.

Глиноземистый цемент применяют при срочных восстановительных работах (ремонт плотин, дорог, мостов, при срочном возведении фундаментов), футеровки шахтных колодцев и туннелей, для тампонирувания нефтяных и газовых скважин, на предприятиях пищевой промышленности, травильных и красильных предприятиях, в качестве футеровки тепловых аппаратов.

Использование его существенно ограничивается стоимостью (он в 3—4 раза дороже портландцемента).

Гидравлическая известь (ГОСТ 9179—77) — гидравлическое минеральное неорганическое вяжущее вещество, получаемое при обжиге не до спекания (900...1100°C) мергелистых известняков с содержанием глины 6...20%.

Гидравлические свойства этой извести обусловлены наличием в ее составе низкоосновных силикатов $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, алюминатов $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и ферритов кальция $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Гидравлическую известь размалывают и применяют в виде порошка либо гасят в пушонку. Так как в ней в значительном количестве содержится свободный оксид кальция CaO , то она, так же как и воздушная известь, гасится при действии воды, причем чем больше содержание свободного CaO , тем меньше ее способность к гидравлическому твердению.

Твердение извести начинается на воздухе (первые 7 суток) и продолжается, при этом увеличивается ее прочность. После 28 суток комбинированного хранения образцов из раствора 1 : 3 по массе (7 суток на воздухе во влажном воздухе и 21 сутки в воде) предел прочности при сжатии составляет:

- слабогидравлической извести — не менее 1,7 МПа;
- сильногидравлической извести — не ниже 5 МПа.

Гидравлическая известь твердеет медленно: начало схватывания — 0,5...2 ч, конец — 8...16 ч.

Растворы и бетоны на гидравлической извести обладают удовлетворительной долговечностью в сухих и влажных условиях, поэтому ее применяют для изготовления кладочных и штукатурных растворов и бетонов невысоких марок и бетонных камней.

Гидравлическую известь хранят в закрытых помещениях, при перевозке предохраняют от увлажнения.

Романцемент — гидравлическое минеральное неорганическое вяжущее вещество, получаемое тонким помолом обожженных не до спекания (900°C) известняковых и магнезиальных мергелей, содержащих 25% и более глины. Гидравлические свойства романцементу придают низкоосновные силикаты и алюминаты кальция, при гидратации которых происходит его схватывание и твердение.

Выпускают трех марок (МПа) — 2,5; 5 и 10. Он должен выдерживать испытание на равномерность изменения объема.

Романцемент применяется для изготовления строительных растворов, стеновых камней и бетонов невысоких марок, что позволяет сэкономить более энергоемкий и дорогой портландцемент.

4.1.2.3. Минеральные вяжущие вещества автоклавного твердения

Твердение этой группы вяжущих веществ основано на техническом синтезе гидросиликатов кальция, происходящем в среде насыщенного водяного пара в промышленных *автоклавах* при температурах 175...200°C и соответствующем давлении пара 0,9...1,3 МПа.

Автоклав — герметичный аппарат для проведения физико-химических процессов при нагреве и повышенном давлении (что увеличивает скорость течения процессов).

Каждое из вяжущих веществ автоклавного твердения содержит две главные части: кремнеземистый компонент (SiO_2 в кристаллической или аморфной форме) и известь (CaO), которые называются *известково-кремнеземистым вяжущим веществом*. Вводимые добавки могут регулировать образование структуры.

Известково-кремнеземистое вяжущее вещество — продукт совместного тонкого помола и гомогенизации смеси извести и кварцевого песка. Песок используют после помола мокрым способом до удельной поверхности 1500...3000 $\text{см}^2/\text{г}$. Вместо песка применяют также золу-унос тепловой электростанции (ТЭС) с удельной поверхностью 3000...5000 $\text{см}^2/\text{г}$.

Указанное вещество имеет низкую активность в обычных условиях, но при автоклавном синтезе образует прочный искусственный камень. Такими же свойствами обладают смеси на основе извести и алюмосиликатных или кальциево-алюмосиликатных материалов природного происхождения, а также смешанные вяжущие вещества на основе портландцемента.

Вяжущие вещества автоклавного твердения применяют для изготовления разнообразных материалов: *пористых* (газосиликат, пеносиликат) — для теплоизоляции элементов наружных стен и покрытий зданий; *плотных* — для конструктивных элементов.

4.1.2.4. Искусственные каменные изделия на основе минеральных неорганических вяжущих веществ

Искусственные каменные изделия получают в процессе формования и последующего затвердевания растворных или бетонных смесей на основе минеральных неорганических вяжущих веществ. В качестве заполнителей для растворных или бетонных смесей применяют кварцевый песок, пемзу, шлак, золу, древесные опилки. Для повышения прочности при изгибе изделия армируют волокнистыми материалами — асбестом, древесиной (в виде шерсти, дробленых отходов), бумажной макулатурой, листовой бумагой и др.

По виду минерального вяжущего вещества искусственные каменные изделия можно разделить на следующие группы: *гипсовые и гипсобетонные; изделия на основе магнезиальных вяжущих и силикатные изделия.*

Гипсовые изделия получают из гипсового теста, т.е. смеси гипса и воды, а гипсобетонные — из смеси гипса, воды и заполнителей. Вяжущими для изготовления гипсовых и гипсобетонных изделий в зависимости от их назначения служат гипсовое вяжущее, водостойкие гипсоцементно-пуццолановые смеси, а также ангидритовые цементы. Заполнителями гипсовых и гипсобетонных изделий являются естественные неорганические материалы — песок, пемза, туф, топливные и металлургические шлаки, а также легкие искусственные пористые заполнители (шлаковая пемза, керамзитовый гравий, аглопорит и др.). В качестве органических заполнителей используются древесные опилки, стружка или шерсть, бумажная макулатура, стебли и волочно камыша, льняная костра и др.

Основные потребительские свойства гипсовых изделий — небольшая плотность, негорючесть, хорошая звукоизоляция. К числу недостатков относятся значительная хрупкость, понижение прочности и высокая ползучесть под нагрузкой при увлажнении.

Искусственное упрочнение гипсовых изделий производят с помощью волокнистых армирующих материалов, вводимых в состав формовочной массы или являющихся частями конструкции самого изделия. В качестве арматуры используются органические волокна, картонная оболочка и т.д. Роль арматуры могут выполнять металлические стержни, проволока или сетка. Однако применять стальную арматуру в гипсовых изделиях без защитного слоя нельзя из-за сильной коррозии.

Гипсовые и гипсобетонные изделия по назначению делят на *панели и плиты перегородочные, листы обшивочные, плиты теплоизоляционные, камни для наружных стен, изделия для перекрытий, изделия огнезащитные, архитектурные детали*. Все эти изделия допускается применять в условиях, исключающих систематическое увлажнение, и в помещениях с относительной влажностью воздуха не более 60%. Для повышения влаго- и водостойкости изделия покрывают водонепроницаемыми защитными красками или пастами (масляными, казеиновыми), а также добавляют к гипсу молотый доменный гранулированный шлак и пуццолановый портландцемент.

4.1.3. Искусственные каменные материалы

4.1.3.1. Бетоны

Бетоны — искусственные камневидные материалы, получаемые в результате формования и твердения рационально подобранной, тщательно перемешанной и уплотненной смеси из вяжущего вещества, воды, мелкого (песок) и крупного (щебень или гравий) заполнителей. До затвердевания эта смесь называется *бетонной смесью*.

Вяжущее вещество и вода являются активными составляющими бетона; в результате реакции между ними получается цементный камень, скрепляющий зерна заполнителей. Зерна песка и щебня составляют каменный остов в бетоне. Цементное тесто, образующееся после смешивания

вания бетонной смеси с водой, обволакивает зерна песка и щебня, заполняет промежутки между ними и играет роль смазки заполнителей, придающей бетонной смеси подвижность (текучесть). Цементное тесто, твердея, связывает зерна заполнителей, и получается искусственный каменный материал — бетон.

Для приготовления бетонной смеси используют водопроводную, питьевую, а также любую воду, имеющую водородный показатель pH не менее 4, т.е. не кислую. Природные воды для приготовления бетона должны браться из мест, достаточно удаленных от места выпуска сточных вод, так как последние содержат жиры, растительные масла, сахар, кислоты и др. и их нельзя использовать для приготовления бетонной смеси. Вода не должна содержать сульфатов более 2700 мг/л (в пересчете на SO_4) и всех солей более 5000 мг/л.

Морская вода и другие соленые воды, удовлетворяющие приведенным выше условиям, могут применяться для изготовления бетонной смеси, за исключением бетонирования внутренних конструкций жилых и общественных зданий, а также надводных железобетонных сооружений в жарких и сухих местах. Морские соли могут выступить на поверхности бетона и вызвать коррозию стальной арматуры.

При выборе вяжущего вещества для бетона учитывают требования, предъявляемые к бетону, — прочность, морозостойкость, химическая стойкость и др. На практике наиболее широко применяют портландцемент марок 400...500. В последнее время в строительстве все больше начинают использовать бетоны с полимерами. Полимеры (поливинилацетат, латексы, водорастворимые смолы и др.) могут вводиться в бетон в различном количестве, что определяет классификацию подобных бетонов на четыре группы: цементно-полимерные бетоны, полимербетоны, бетонополимеры и бетоны, содержащие полимерные материалы (заполнители, дисперсная арматура или микрозаполнители).

Заполнители (песок, гравий, щебень) в большинстве случаев не вступают в химическое соединение с цементом и водой. Эти материалы образуют жесткий скелет бетона и уменьшают его усадку, вызываемую усадкой цементного камня при твердении. Пористые заполнители уменьшают плотность и теплопроводность бетона.

При использовании гравия в качестве заполнителя для бетонных смесей его преимуществами являются:

- существование гравия в природе в раздробленном состоянии (дроблению подвергают только крупные куски);
- меньший объем пустот и несколько большая подвижность бетонной смеси, что связано с лучшей окатанностью зерен гравия и обеспечивает больший выход бетона.

Преимуществами щебня являются более высокое, чем у гравия, сцепление с цементным раствором при затвердевании и меньшая загрязненность. Для высокопрочных бетонов лучше применять щебень.

Для бетона невысоких марок можно использовать щебень из промышленных отходов: шлаков, кирпичного боя, дробленого бетона.

В бетон могут вводиться *специальные добавки*, которые подразделяют на две группы. К первой группе относятся *химические вещества*, добавляемые в бетон в небольшом (0,1...2% массы цемента) количестве для изменения в необходимом направлении свойств бетонной смеси и бетона. Ко второй группе относятся *тонкомолотые материалы*, добавляемые в бетон в количестве 5...20% и более для экономии цемента.

Химические вещества, добавляемые в бетон, классифицируют по основному эффекту действия:

1) добавки, регулирующие свойства бетонных смесей:

- *пластифицирующие добавки (пластификаторы)*, т.е. увеличивающие подвижность бетонной смеси;

- *стабилизирующие добавки*, т.е. предупреждающие расслоение бетонной смеси;

- *водоудерживающие добавки*, т.е. уменьшающие водоотделение;

2) добавки, регулирующие схватывание бетонных смесей и твердение бетона:

- *добавки, ускоряющие или замедляющие схватывание*;

- *добавки, ускоряющие и обеспечивающие твердение*, в том числе при отрицательных температурах;

3) добавки, регулирующие плотность и пористость бетонной смеси и бетона, — *воздухововлекающие, газо- и пенообразующие добавки, уплотняющие добавки* для удаления воздуха и *расширяющие добавки* для снятия деформаций бетона;

4) добавки, придающие бетону специальные свойства:

- *гидрофобизирующие добавки*, т.е. уменьшающие смачивание бетона;

- *антикоррозийные добавки и ингибиторы коррозии стали*;

- *антистарители*, придающие бактерицидные и инсектицидные свойства;

- *красители*.

К химическим веществам, добавляемым в бетон в качестве пластификаторов, относятся поверхностно-активные вещества (ПАВ), например сульфитно-дрожжевая бражка — отходы переработки целлюлозы, асидол — отходы переработки нефти. В последнее время разработаны и внедряются в строительство новые химические добавки — суперпластификаторы (синтетические полимерные вещества), резко увеличивающие подвижность и текучесть бетонной смеси и существенно улучшающие

строительно-технологические свойства бетона. Некоторые добавки обладают полифункциональным действием.

Тонкомолотые материалы — золы, молотые шлаки, отходы камнедробления и др. — используются в качестве заменителя цемента, а также для придания бетону таких свойств, как жаростойкость, электропроводность, цвет и т.п.

Структура бетона образуется в результате схватывания бетонной смеси и последующего твердения. Образовавшаяся после твердения бетонной смеси структура бетона с плотными заполнителями представляет собой цементный камень с утопленными в нем зернами заполнителя, имеющий множество пор и пустот разных размеров и происхождения. В бетоне различают макроструктуру, представленную системой «щебень — цементно-песчаный раствор»; мезоструктуру, показывающую строение системы «песок — цементный камень», и микроструктуру — тонкое строение цементного камня и заполнителя.

Макро- и мезоструктуры бетона в зависимости от величины раздвижки зерен заполнителя цементным камнем можно разделить на три вида:

- 1) зерна заполнителя значительно раздвинуты цементным камнем и как бы плавают в нем;
- 2) цементный камень заполняет поры между зернами заполнителя и лишь незначительно раздвигает их, покрывая тонким слоем;
- 3) зерна заполнителя контактируют друг с другом через тонкую прослойку цементного камня, который лишь частично заполняет пустоты между его зернами.

Наиболее оптимальной является структура второго вида, которая обеспечивает высокую плотность и заданную прочность бетона при минимальном расходе цемента.

Микроструктура цементного камня в бетоне состоит из новообразований и непрореагировавших зерен цемента и микропор различных размеров. С увеличением возраста бетона его микроструктура в результате продолжающейся гидратации цемента изменяется: возрастает количество новообразований цементного камня, уменьшается его пористость, изменяется распределение пор по размерам.

Изменение структуры бетона вызывает повышение его прочности при благоприятных температуре и влажности. Первые 7 суток после изготовления прочность бетона нарастает быстро, в дальнейшем же, особенно после 28 суток, этот процесс замедляется.

Скорости твердения и, следовательно, нарастания прочности зависят от вида цемента, а также от температуры и влажности среды. Твердение бетона при температуре ниже 15°C замедляется, а при температуре ниже 0°C может прекратиться. В сухой среде, после того как свободная вода

бетонной смеси испарится, твердение бетона прекращается. Наоборот, при повышенной температуре и достаточной влажности (в горячей воде при температуре до 0°C, во влажном паре с температурой до 100°C или в автоклаве при действии насыщенного водяного пара высокого давления и температуре около 175°C) твердение бетона идет значительно быстрее, чем в нормальных условиях.

Прочность бетона при нормальных условиях твердения повышается приблизительно пропорционально логарифму времени:

$$R_n = R_{28} \lg n / \lg 28, \quad (25)$$

где R_n и R_{28} — пределы прочности на сжатие бетонов, соответственно, в любой срок (n — количество дней) и в возрасте 28 суток.

Прочность бетона — одно из главных его строительных свойств. Она определяет способность бетона противостоять внешним механическим усилиям. Разрушение бетона под нагрузкой происходит в том случае, когда по всему сечению преодолевается предел прочности материала, т.е. сопротивление отрыву одних частиц от других. Разрушению предшествует появление микротрещин в местах концентрации напряжений, что ведет к постепенному ослаблению структуры бетона. При сжатии бетон разрушается от разрыва в направлении, перпендикулярном действующему усилию.

Общую классификацию бетонов производят по плотности, структуре, виду вяжущего и виду заполнителя, условиям твердения и назначению.

Плотность является главным классификационным признаком бетонов, так как с ней связаны его основные свойства — прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, теплопроводность и др. Плотность бетона зависит главным образом от плотности цементного камня, вида заполнителей и его структуры.

По плотности бетоны разделяются на пять видов:

1) *особо тяжелый*, содержащий такие тяжелые заполнители, как стальные опилки или зерна (стальбетон), железные руды или барит (баритовый бетон); плотность этого бетона выше 2600 кг/м³;

2) *тяжелый* (обычный), содержащий плотные заполнители (кварцевый песок, щебень или гравий из плотных каменных пород); плотность этого бетона 2100...2600 кг/м³;

3) *облегченный*, например с кирпичным щебнем или крупнопористый (беспесчаный); плотность 1800...2000 кг/м³;

4) *легкий*, содержащий пористые заполнители (шлак, пемзу, туф и т.п.), обычной плотной структуры или крупнопористый; его плотность 1200...1800 кг/м³ (чаще 1300...1500 кг/м³);

5) *особо легкий*, очень пористый, ячеистый (пенобетон, газобетон) или крупнопористый с легкими заполнителями; плотность — меньше 1200 кг/м³ (чаще 500...800 кг/м³).

По структуре бетоны классифицируют на *плотные, поризованные, ячеистые и крупнопористые*.

По виду вяжущих веществ бетоны подразделяются на следующие виды:

- *цементные* — на гидравлических вяжущих веществах (портланд-цементе и его разновидностях);
- *цементно-полимерные*;
- *силикатные* — на известковых вяжущих веществах в сочетании с силикатными или алюминатными компонентами;
- *гипсовые* — с применением гипсоангидритовых вяжущих веществ;
- *на шлаковых и специальных вяжущих материалах*.

По виду заполнителя различают бетоны на *плотных заполнителях, бетоны на пористых заполнителях и бетоны на специальных заполнителях*, удовлетворяющих специальным требованиям (защита от излучений, жаро- и химически стойкие и др.).

В зависимости от твердения разделяют бетоны:

- *твердеющие в естественных условиях*;
- *твердеющие в условиях тепловлажностной обработки при атмосферном давлении*;
- *автоклавного твердения*, твердеющие в условиях тепловлажностной обработки при давлении выше атмосферного.

По условиям твердения (способу производства) различают бетоны с *уплотнением вибрацией, трамбованные, литые, центрифугированные, подводного твердения*, а также *вибробетоны*.

По назначению различают *конструкционные и специальные бетоны*.

К конструкционным бетонам относятся:

- *фундаментный (обычный)*, используемый для железобетонных конструкций (фундаментов, колонн, балок, перекрытий, сводов, мостов и др.);
- *гидротехнический*, используемый для плотин, шлюзов, облицовки каналов, водопроводно-канализационных сооружений и др.;
- *облицовочный*, используемый для стен зданий и легких перекрытий (главным образом легкий бетон);
- *теплоизоляционный особо легкий* (пено- и газобетоны);
- *дорожный бетон*, используемый для полов, тротуаров, дорожных и аэродромных покрытий.

Специальные виды бетонов различают как *жаро- и химически стойкие, декоративные, радиационно-защитные* и др.

В зависимости от назначения бетоны должны удовлетворять следующим требованиям:

- бетоны для обычных железобетонных конструкций должны иметь заданную прочность (главным образом при сжатии), а для сооружений, находящихся на открытом воздухе, — морозостойкими;

- бетоны для гидротехнических сооружений должны обладать высокой плотностью, достаточной прочностью, малой усадкой, малым выделением теплоты при твердении, стойкостью против выщелачивающего действия фильтрующих вод и в ряде случаев стойкостью по отношению к действию минерализованных вод;

- бетоны для стен отапливаемых зданий и легких перекрытий должны иметь небольшие плотность и теплопроводность, а также прочность в соответствии с проектным расчетом;

- бетоны для полов должны характеризоваться малой изнашиваемостью и достаточной прочностью на изгиб, а бетоны для дорожных и аэродромных покрытий — морозостойкостью.

Кроме того, ко всем бетонам и бетонным смесям предъявляются следующие общие требования:

- до твердения бетонные смеси должны легко перемешиваться, транспортироваться и укладываться (т.е. обладать подвижностью и удобоукладываемостью), не расслаиваться;

- бетоны должны иметь определенную скорость твердения в соответствии с заданными сроками снятия опалубки с изделий или конструкций;

- расход цемента должен быть минимальным.

При эксплуатации бетонных изделий и конструкций *коррозия бетона* вызывается главным образом разрушением цементного камня в результате проникновения агрессивного вещества в толщу бетона. Коррозия бетона особенно интенсивна при постоянной фильтрации такого вещества.

Антикоррозийная защита изделий и конструкций из бетона обеспечивается увеличением его плотности, тщательным подбором состава, рациональной укладкой и уплотнением бетонной смеси, введением в эту смесь компонентов, повышающих коррозионную стойкость, и удалением из нее веществ, способствующих коррозии. Широко используют защитные покрытия, изолирующие сооружение из бетона от внешней среды. Кроме того, изменяют состав среды — вводят в нее вещества, замедляющие коррозию, или удаляют компоненты, особо опасные в коррозионном отношении (нейтрализация, водоотвод и др.).

Тяжелые бетоны. Тяжелый бетон получил наиболее широкое применение в строительстве. В зависимости от вида конструкции или изделия и предъявляемых к ним требований тяжелый бетон должен иметь определенную прочность и стойкость в заданных условиях эксплуатации. Свойства бетонной смеси должны соответствовать принятым

Рис. 73. Зависимость прочности бетона от величины водоцементного отношения

способам ее укладки и уплотнения и обеспечивать получение плотного бетона, имеющего хорошее сцепление с арматурой в железобетонных конструкциях и предохраняющего ее от коррозии.

Прочность тяжелого бетона R_b к определенному сроку при твердении в нормальных условиях (температура 15...20°C и относительная влажность окружающего воздуха 90...100%) зависит главным образом от двух факторов: прочности (активности) цемента $R_{ц}$ и водоцементного отношения.

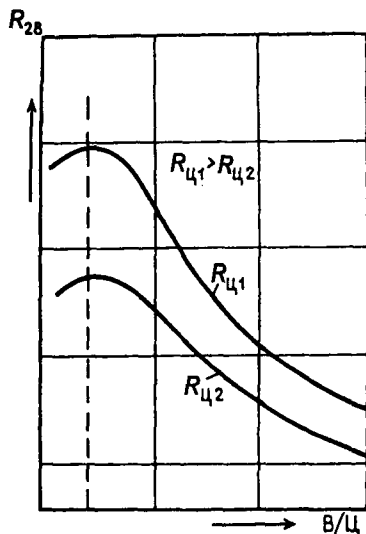
Водоцементным отношением (В/Ц) называют отношение массы воды к массе цемента в свежееизготовленной бетонной смеси, причем учитывают только свободную, не поглощенную заполнителями воду.

Прочность бетона прямо пропорциональна прочности цемента. Зависимость прочности бетона от водоцементного соотношения более сложная (имеет вид гиперболы) и соблюдается лишь в определенных пределах последнего: с уменьшением В/Ц прочность бетона не увеличивается, а даже начинает уменьшаться (рис. 73), так как сокращение содержания воды ниже определенных пределов влечет за собой неполноту гидратации и, следовательно, понижение прочности бетона.

Прочность бетона характеризуется его маркой, которая определяется пределом прочности при сжатии, установленным стандартным методом. Для тяжелых бетонов применяют марки М100, М150, М200, М250, М300, М350, М400, М450, М500, М600.

Марки бетона могут быть определены также и по прочности на растяжение при изгибе, например для тяжелых бетонов, применяемых в дорожном и аэродромном строительстве. Прочность бетона при изгибе в несколько раз меньше прочности бетона при сжатии, и его марки на растяжение при изгибе могут быть: М15, М20, М25, М30, М35, М40, М45, М50, М55.

Качество бетона нельзя достаточно полно оценить по его средней прочности или марке. На практике всегда наблюдаются отклонения от этой величины, связанные с изменением активности цемента, свойств заполнителей, дозировки материалов и другими факторами, что приводит к неоднородности структуры. Чем выше однородность бетона, тем с большей надежностью получают его заданную прочность. Коэффици-



ент вариации прочности бетона колеблется от 0,05 до 0,2. Величина гарантированной прочности на сжатие с обеспеченностью 0,95 (СТ СЭВ 1406—78) характеризуется классами В1; В1,5; В2; В2,5; В3,5; В5; В7,5; В10; В12,5; В15; В20; В25; В30; В40; В45; В50; В55; В60. Для перехода от класса бетона В к средней прочности бетона (МПа), которую контролируют на производстве, следует применять формулу:

$$R_{\text{ср}}^6 = B/0,778. \quad (26)$$

О деформационных свойствах бетона при приложении нагрузки судят по его модулю деформации (модулю Юнга). Модуль деформации бетона повышается с его прочностью и составляет для бетона марки М100 — 1900 МПа, М500 — 4100 МПа.

Ползучесть бетона проявляется в виде необратимых деформаций, возникающих при длительном действии постоянной нагрузки. Уменьшению ползучести способствуют понижение расхода цемента и водоцементного отношения, повышение крупности заполнителей и уменьшение их деформационных свойств, увеличение возраста бетона и его прочности.

Температурный коэффициент линейного расширения бетона в среднем составляет $10 \cdot 10^{-6}$, что близко к коэффициенту линейного расширения сталей и способствует совместной работе этих материалов в железобетонных конструкциях.

Водонепроницаемость бетона зависит от его плотности и структуры. Бетон мелкопористой структуры и однородного состава, тщательно уплотненный и достаточно затвердевший практически водонепроницаем в слоях значительной толщины. Для конструкций, от которых требуется водонепроницаемость, установлены марки: W2, W4, W6, W8, W10, W12. Жидкости, имеющие малую вязкость и плотность существенно меньше единицы (керосин, бензин, смазочные масла и др.), проникают через бетон, поэтому поверхность бетона, предназначенного для хранения тяжелых нефтепродуктов, покрывают жидким стеклом или пленками из пластмасс.

Морозостойкость бетона зависит от его строения, в частности от количества крупных (более 10^{-3} мм) пор, которые образуются водой, не вступившей в химическое взаимодействие с цементом. Для конструкций, подвергающихся в увлажненном состоянии циклически замораживанию и оттаиванию, установлены марки по морозостойкости: F 50, F 75, F 100, F 150, F 200, F 300, F 400, F 500.

Усадка бетона проявляется при твердении в атмосферных условиях или при недостаточной влажности среды. В среднем за год усадка тяжелого бетона составляет 0,0002...0,0004, или 0,2...0,4 мм/м. Усадка увеличивается с возрастом бетона и при понижении влажности окружающего воздуха.

Защиту бетона от коррозии обеспечивают следующим образом:

- придают бетону повышенную плотность;
- устраивают водонепроницаемую оболочку вокруг бетона;
- выбирают цемент с малым выделением свободного гидроксида кальция и с низким содержанием трехкальцевого алюмината (шлакопортланд-цемент, сульфатостойкие цементы, глиноземистый цемент и др.);
- покрывают кислотоупорными плитками или камнями, выложенными на кислотоупорном цементе.

Тяжелые бетоны специального назначения. Высокопрочный бетон (прочностью 60...100 МПа) получают на основе цемента высоких марок (выше 400), промытого песка и щебня прочностью не ниже 100 МПа. При приготовлении такого бетона используют большой, иногда предельный, расход цемента, предельно низкое водоцементное отношение, суперпластификаторы, особо тщательные перемешивание и уплотнение бетонной смеси и уход за бетоном, различные способы повышения активности цемента и качества бетона (активацию цемента, виброактивацию бетонной смеси и др.).

Выделение теплоты и усадка бетона, связанные с твердением цемента и вызывающие внутренние напряжения в бетоне, возрастают с увеличением расхода цемента, поэтому для массивных сооружений его количество необходимо особенно ограничивать. Максимально допустимый расход цемента в высокопрочном бетоне для массивных сооружений не должен превышать при применении обычного портландцемента 375 кг/м³, а во всех остальных случаях — 500 кг/м³.

Заполнители высокопрочного бетона должны быть чистыми и обладать хорошим зерновым составом и малой пустотностью. В качестве крупного заполнителя применяется фракционный щебень из плотных и прочных горных пород. Предел прочности при сжатии исходных каменных пород должен быть не менее 100 МПа для изверженных и 80 МПа для осадочных пород. Песок для высокопрочного бетона должен иметь пустотность не более 40%.

Быстротвердеющий бетон — бетон, обладающий относительно высокой прочностью в раннем возрасте (1...3 суток) при твердении в нормальных условиях. Для получения такого бетона используется быстротвердеющий цемент, а также применяются различные способы ускорения твердения цемента: снижение значений водоцементного соотношения и жесткой цементной смеси, введение добавок — ускорителей твердения (CaCl₂, NH₄Cl и др.), сухое или мокрое домалывание цемента с добавлением гипса (2...5% массы цемента), виброперемешивание или виброактивация цементного раствора. Наилучшие результаты получаются при проведении комплекса мероприятий.

Бетоны для дорожных и аэродромных покрытий должны иметь соответствующую прочность на изгиб, так как основными расчетными на-

пряжениями при их использовании являются напряжения изгиба. Кроме того, такие бетоны должны обладать достаточной морозостойкостью.

Для дорожного бетона применяют портландцемент высоких марок, качественные высокопрочные заполнители — щебень крупностью до 40 мм и чистый песок, что улучшает сцепление цементного камня с заполнителем и обеспечивает необходимую прочность на изгиб. Долговечность бетона достигается ограничением водоцементного соотношения, которое должно быть не более 0,5 для сурового, 0,53 для умеренного и 0,55 для мягкого климата.

Повышению долговечности дорожного бетона способствует применение пластифицированных и гидрофобных цемента и воздухововлекающих добавок.

Мелкозернистый бетон отличается большим содержанием цементного камня, поэтому его усадка и ползучесть несколько выше. Свойства мелкозернистого бетона определяются теми же факторами, что и обычного. Однако качество песка оказывает более заметное (на 25...30%) влияние на прочность. Мелкозернистый бетон обладает повышенной прочностью на изгиб, хорошей водонепроницаемостью и морозостойкостью.

Мелкозернистые бетоны широко применяются при изготовлении силикатных изделий. Такой бетон, не содержащий щебня, используют для изготовления тонкостенных железобетонных конструкций. Армируя этот бетон стальными ткаными сетками, получают *армоцемент* — высокопрочный материал для тонкостенных конструкций.

В полевых условиях в районах, где отсутствуют щебень и гравийно-песчаная смесь, мелкозернистый бетон можно использовать для изготовления железобетонных конструкций, а при отсутствии хорошего щебня — для дорожного строительства, труб, гидротехнических конструкций.

Водонепроницаемый бетон — конструкционный бетон, не пропускающий воду при давлении от 0,2 МПа и выше. Водонепроницаемость бетона зависит от размеров и количества сообщающихся пор и капилляров. Основными способами повышения водонепроницаемости являются:

- уменьшение водоцементного отношения;
- увеличение расхода цемента и тонкости его помола;
- применение специальных расширяющихся, глиноземистых и других цемента;
- введение добавок (тонкомолотых, уплотняющих, пластифицирующих, воздухововлекающих, комплексных);
- использование специальных методов уплотнения бетонной смеси;
- обеспечение специальных условий твердения, повышающих степень гидратации цемента (например, водотепловой обработкой).

Для тяжелых бетонов предусмотрены марки (СНиП 11-21-75) по водонепроницаемости: W 2, W 4, W 6, W 8, W 10, W 12. Водонепроницаемый бетон применяется в шахтном, гидротехническом, транспортном строительстве и др.

Жаростойкие бетоны сохраняют физико-химические свойства при длительном воздействии высоких температур (обычно в пределах 1600°С). Вяжущими веществами для жаростойких бетонов служат портланд-цемент, глиноземистый цемент, жидкое стекло и др.; заполнителями — дробленые огнеупорные или тугоплавкие горные породы или искусственные материалы.

Выбор материалов для жаростойкого бетона производят в зависимости от условий и температуры его эксплуатации (табл. 9). Для улучшения однородности и жаростойкости повышают содержание мелкого заполнителя.

Таблица 9

Выбор состава жаростойких бетонов

Предельная температура службы бетона, °С, при одностороннем нагреве	Тонкомолотая добавка	Мелкий и крупный заполнители	Стабилизатор или добавка для твердения	Состав (Ц:Д:П:Щ)
<i>Бетон на портландцементе</i>				
1700	Хромит и магнезит	Хромит (30 кг/м³)	Фосфоритная мука	1:1:3:3,5
1100	Шамот, лесс	Шамот	—	1:1:1:1,5:1,5
700	Цемянка, пемза, доменный гранулированный шлак	Бой глиняного кирпича, базальт, диабаз, андезит	—	1:1:2:2
350	—	Базальт, андезит, диабаз	—	1:3:3
<i>Бетон на жидком стекле</i>				
1400	Магнезит	Бой магнезитового кирпича	Кремнефтористый натрий (20 кг/м³)	1:2:2:4
1000	Хромит	Хромит	То же (30 — 40 кг/м³)	1:2:2,5:4
900	Шамот	Шамот	То же	1:1,5:1,5:2
600	Шамот, андезит, диабаз	Базальт, диабаз, андезит	То же	1:1,5:2:3
<i>Бетон на глиноземистом цементе</i>				
1400	—	Хромит	—	1:3:3

Плотность свежесделанных жаростойких бетонов зависит от вида наполнителя и составляет 1800...3000 кг/м³. Плотность сухих бетонов по сравнению с плотностью свежесделанных меньше примерно на 150...200 кг/м³.

Минимально допустимая марка бетона на портландцементе и глиноземистом цементе — М250, бетона на жидком стекле — М150. При нагреве прочность снижается (после длительного нагрева до предельной температуры службы она составляет не более 3...4 МПа для бетона на портландцементе и 7...9 — для бетона на жидком стекле).

Жаростойкие бетоны применяются при сооружении дымовых труб, фундаментов доменных печей, тепловых промышленных агрегатов и т.п. Бетоны на жидком стекле не применяют в условиях частого воздействия воды, бетоны на портландцементе — в условиях кислой агрессивной среды. Для бетонов, испытывающих тепловой удар, не используют магнезитовый заполнитель, имеющий высокий температурный коэффициент линейного расширения, а также ограничивают максимальный размер щебня (10...20 мм).

Бетоны на портландцементе разных составов используются при одностороннем нагреве с предельной температурой 1700°C, на глиноземистом цементе и жидком стекле — до 1400°C.

Кислотоупорный бетон изготавливают из кислотоупорного цемента, затворяя его жидким стеклом, используя в качестве добавок кремнефтористый натрий Na_2SiF_6 , молотый кварцевый песок и кислотоупорные заполнители. Его твердение происходит в теплой воздушно-сухой среде. Вода и слабые кислоты постепенно разрушают такой бетон; действию концентрированных кислот он сопротивляется хорошо, но растворы щелочей легко разрушают его.

Кислотоупорный бетон успешно заменяет в химической промышленности более дорогие конструкционные материалы — листовой свинец, кислотоупорную керамику, тесаный камень и др.

Бетон для защиты от радиоактивного воздействия характеризуется степенью защиты от гамма- и нейтронного излучения, представляющего наибольшую опасность для живых организмов. Степень защиты зависит от плотности ограждения и его толщины.

В бетоне для защиты от радиоактивного воздействия в качестве заполнителей применяют материалы с высокой плотностью — барит, магнетит, лимонит, а также металлический скрап в виде чугунной дробы, обрезков арматурного полосового и профилированного металла, металлической стружки и др.

При приготовлении особо тяжелых бетонов для защиты от радиоактивного воздействия в качестве вяжущих веществ применяют портландцементы, шлакопортландцементы и глиноземистые цементы.

Декоративные бетоны получают введением в бетонную смесь щелочных и светостойких пигментов (охры, сурика и др.) в количестве 8...10%

от массы цемента (или цветных цементов). В зависимости от состава и назначения декоративные бетоны можно подразделить на *цветные и бетоны, имитирующие природные камни* или обладающие особо выразительной структурой.

В цветных бетонах используют чистые кварцевые пески, желательно светлых оттенков без примеси частиц из оксидов железа, которые окрашивают пески и бетоны в серый цвет. В качестве крупных заполнителей могут применяться светлый известняк и доломит. В отдельных случаях используют заполнители, обладающие необходимым цветом, например туфы, красные кварциты, мрамор и другие окрашенные горные породы.

В бетонах, имитирующих природные камни, специальные приемы позволяют обнажить заполнитель и выявить структуру бетона. Для получения необходимой декоративности помимо белого цемента и соответствующих пигментов и добавок используют мелкий и крупный заполнители, которые позволяют получить соответствующую структуру материала. Заполнителями в этом случае могут быть дробленые мрамор, гранит, базальт, слюда, цветное стекло и другие материалы.

При необходимости поверхность бетона может подвергаться специальной обработке (шлифовке и полировке) для получения выразительной декоративной фактуры. В строительстве широко применяют изделия со вскрытой структурой заполнителя, например гранитного щебня, которую получают нанесением на поверхность бетона или на поверхность формы, в которой происходит бетонирование изделия, специальных составов, проникающих в поверхностные слои бетона и замедляющих твердение цементного камня. В результате поверхностный слой цементного камня становится слабым и легко удаляется водяной струей высокого давления, жесткими щетками или пескоструйной обработкой.

Детали из декоративного бетона хорошо сочетаются с другими материалами: камнем, эмалированной сталью, пластиком.

Легкими бетонами называют все виды бетонов, имеющих среднюю плотность в воздушно-сухом состоянии — от 200 до 2000 кг/м³. В легких бетонах применяют пористые заполнители.

Главные требования, предъявляемые к легкому бетону, — заданная средняя плотность, необходимая прочность к определенному сроку твердения, пониженная теплопроводность и долговечность (стойкость).

Структура легкого бетона формируется при участии физических и химических процессов, протекающих в местах контактов пористого зерна заполнителя с цементным тестом и камнем. Цементное тесто проникает в поверхностные поры зерна, при этом зерно отсасывает некоторое количество воды из прилегающего к нему слоя цементного теста, понижая В/Ц, поэтому в бетоне плотной структуры каждое пористое зерно окружено контактными слоями. Сцепление вяжущего вещества с пористым заполнителем, обусловленное механическим зацеплением

цементного камня в порах зерна, возрастает вследствие химического взаимодействия контактирующих фаз.

Большинство пористых заполнителей (керамзит, аглопорит и др.) содержат аморфный SiO_2 , способный химически реагировать с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образующимся при гидратации цемента, что приводит к образованию на поверхности контакта нерастворимого в воде гидросиликата кальция $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, упрочняющего контактный слой «пористое зерно — цементный камень». Вот почему бетон на пористом заполнителе (в котором 75...80% объема заполнено пористыми зернами) не пропускает воду и жидкости даже при большом одностороннем давлении и оказывается достаточно морозостойким. Этот же эффект обеспечивает необходимую защиту от коррозии стальной арматуры, что позволяет в обычных условиях эксплуатации не применять специальных защитных мер по ее сохранению.

Легкие бетоны классифицируют по различным признакам: *по плотности, видам вяжущего вещества и заполнителя, структуре, теплопроводности, водонепроницаемости, прочности, морозостойкости и основному назначению.*

По плотности в сухом состоянии легкие бетоны подразделяют на марки, кг/м³: D 200; D 300; D 400; D 500; D 600; D 700; D 800; D 900; D 1000; D 1100; D 1200; D 1300; D 1400; D 1500; D 1600; D 1700; D 1800; D 1900; D 2000.

По виду вяжущего вещества легкие бетоны могут быть выполнены на основе цементных, известковых, шлаковых, гипсовых, полимерных, обжиговых и других вяжущих материалов.

По виду крупного пористого заполнителя установлены следующие виды легких бетонов: *керамзитобетон, шунгизитобетон, аглопоритобетон, шлакопемзобетон, перлитобетон, бетон на щебне из пористых горных пород, вермикулитобетон, шлакобетон* (бетон на топливном или пористом отвальном металлургическом шлаке), *бетоны на аглопоритовом или зольном гравии.*

По структуре различают *плотные, поризованные и крупнопористые бетоны.*

Теплопроводность легких бетонов (0,15...0,75 Вт/(м·°C)) зависит в основном от плотности и влажности. Увеличение объемной влажности легкого бетона на 1% повышает его теплопроводность на 0,016...0,035 Вт/(м·°C).

Для легких бетонов на пористом заполнителе установлены марки по максимальному давлению, при котором они еще не пропускают воду (водонепроницаемости), МПа: W 0,2; W 0,4; W 0,6; W 0,8; W 1; W 1,2. Водонепроницаемость плотных легких бетонов может быть высокой.

Прочность легкого бетона зависит от марки цемента, водоцементного отношения (рис. 74) и прочности пористого заполнителя.

Рис. 74. Зависимость прочности легкого бетона от расхода воды при замешивании ($B_{\text{опт}}$ — оптимальное количество воды)

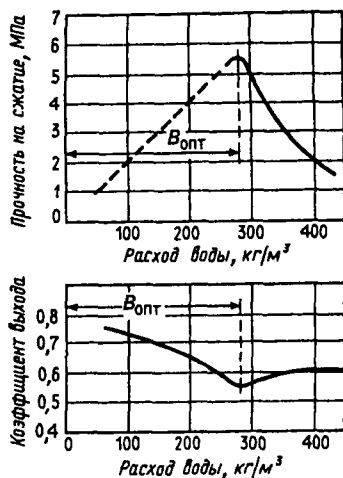
Основным показателем прочности легкого бетона является его класс по прочности при сжатии. Установлены следующие классы, МПа: В 2; В 2,5; В 3,5; В 5; В 7,5; В 10; В 12,5; В 15; В 17,5; В 20; В 22,5; В 25; В 30; В 40; для теплоизоляционных бетонов предусмотрены, кроме того, классы: В 0,35; В 0,75; В 1. Для изделий и конструкций, запроектированных без учета требований стандарта СЭВ 1406—78, показатели прочности легкого бетона на сжатие характеризуют марками, кгс/см²: М 35; М 50; М 75; М 100; М 150; М 200; М 250; М 350; М 400; М 450; М 500. Для теплоизоляционных бетонов предусмотрены марки М 5; М 10; М 15; М 25.

Морозостойкость легких бетонов ниже, чем тяжелых, но достаточна для применения в стеновых конструкциях зданий и сооружений. Повышение морозостойкости может быть достигнуто с помощью искусственных пористых заполнителей, обладающих низким водопоглощением, например керамзита, либо поризацией цементного камня. По морозостойкости легкие бетоны делят на марки F 25; F 35; F 50; F 75; F 100; F 150; F 200; F 300; F 400; F 500.

По назначению легкие бетоны классифицируются на группы: *конструкционные*, включая *конструкционно-теплоизоляционные*, *теплоизоляционные* и *акустические*.

Конструкционные легкие бетоны обладают плотностью 1401...1800 кг/м³, прочностью на сжатие 15...50 МПа и чаще всего используются для сооружения легких несущих железобетонных конструкций (пролетных строений мостов, ферм, гидротехнических сооружений, элементов перекрытий и покрытий зданий и др.). Конструкционно-теплоизоляционные легкие бетоны имеют плотность 501...1400 кг/м³ и прочность 2,5...10 МПа и являются основным материалом, используемым для ограждающих конструкций зданий. Теплоизоляционный и акустический легкие бетоны плотностью до 500 кг/м³ широко применяются в слоистых конструкциях как утеплитель и звукопоглощающий материал.

В состав крупнопористого (беспесчаного) бетона входят гравий или щебень крупностью 5...20 мм, портландцемент или шлакопортландцемент марок 300...400 и вода.



Плотность бетона равна $1700...1900 \text{ кг/м}^3$. Исключение песка из состава крупнопористого бетона снижает его плотность примерно на $600...700 \text{ кг/м}^3$.

Отсутствие песка и ограниченный расход цемента позволяют получить пористый бетон теплопроводностью $0,55...0,8 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ марок М 15, ..., М 75.

Крупнопористый бетон целесообразно применять при возведении монолитных наружных стен зданий и изготовлении крупных стеновых блоков в районах, богатых гравием. Стены из такого бетона оштукатуривают с двух сторон, чтобы устранить продувание.

Крупнопористый бетон на пористом заполнителе (керамзитовом гравии и др.) имеет небольшую плотность ($500...700 \text{ кг/м}^3$) и используется как теплоизоляционный материал.

Гипсобетон изготавливают на основе строительного гипса, высокопрочного гипса или гипсоцементно-пуццоланового вяжущего вещества, обеспечивающего получение водостойких изделий. В качестве пористых заполнителей используются топливные шлаки, керамзитовый гравий и др., возможно применение комбинированных заполнителей из кварцевого песка и древесных опилок.

Плотность гипсобетона в зависимости от применяемого заполнителя и водогипсового отношения составляет $1000...1600 \text{ кг/м}^3$ (марки М 25, М 50).

С целью снижения плотности вводят порообразующие добавки, а для повышения прочности на изгиб и уменьшения хрупкости — волокнистые наполнители (древесные волокна, измельченная бумажная масса, синтетические волокна).

Гипсобетон широко применяют для изготовления сплошных и пустотелых перегородок. Плиты можно армировать штукатурной дранью, камышом и др. Стальная арматура (проволока) в гипсобетоне должна быть защищена от коррозии специальной обмазкой (цементно-казеиновой, битумной или полимерной).

Ячеистый бетон — разновидность легкого бетона с равномерно распределенными порами (до 85% общего объема бетона); его получают в результате затвердевания вспученной при помощи порообразователя смеси вяжущего, кремнеземистого компонента и воды. В зависимости от применяемого вяжущего вещества ячеистые бетоны делят на следующие группы:

- *газобетоны и пенобетоны*, получаемые на основе портландцемента или цементно-известкового вяжущего;
- *газошлакобетоны и пеношлакобетоны*, получаемые из смеси извести и тонкомолотых доменных гранулированных шлаков или золы-уноса.

Деление ячеистых бетонов на газобетон и пенобетон (газошлакобетон и пеношлакобетон) определяется способом изготовления. Газобетон изготавливают, применяя газообразователь. Пенобетон получают, смешивая отдельно приготовленную растворную смесь и пену, образующую воздушные ячейки. Преимущественно производится газобетон, так как его технология более проста и позволяет получить материал пониженной плотности со стабильными свойствами.

Усадка ячеистого бетона зависит от его состава, плотности и условий твердения. Бетон плотностью $600\ldots 800 \text{ кг/м}^3$ на воздухе с $70\ldots 80\%$ -ной относительной влажностью и температурой 20°C имеет усадку $0,4\ldots 0,6 \text{ мм/м}$.

В структуре ячеистого бетона пористость обусловлена наличием макропор ($0,5\ldots 2 \text{ мм}$) и микропор (менее $0,01 \text{ мм}$). Макропоры образованы газо- или пенообразователями и равномерно распределены в объеме бетона. Микропоры находятся в межпоровых перегородках и образованы водой, не связанной химически вяжущим веществом. Следовательно, бетон можно рассматривать как газонаполненный искусственный камень. Объем порового пространства, а также распределение, форма и размеры пор определяют все основные свойства ячеистого бетона.

По показателям плотности установлены следующие марки ячеистого бетона: D 300; D 400; D 500; D 600; D 700; D 800; D 900; D 1000; D 1100; D 1200. Прочность ячеистого бетона зависит от его плотности, вида и свойств исходных материалов, от режима тепловлажностной обработки и влажности бетона. В зависимости от прочности на сжатие установлены следующие классы, МПа: В 0,35; В 0,75; В 0,85; В 1; В 1,5; В 2,5; В 3,5; В 7,5; В 10; В 12,5; В 17,5; В 20. Для изделий из ячеистых бетонов, проектируемых без учета требований стандарта СЭВ 1406—78, показатели прочности на сжатие характеризуются марками, кгс/м^2 : М 5; М 10; М 15; М 25; М 35; М 50; М 75; М 100; М 150; М 200.

Водопоглощение и морозостойкость ячеистого бетона зависят от величины и характера пористости и плотности перегородок между макропорами. Установлены следующие марки ячеистого бетона по морозостойкости: F 15; F 25; F 35; F 50; F 100. Для снижения водопоглощения и повышения морозостойкости стремятся создать ячеистую структуру с замкнутыми порами, применяя, в частности, вибрационную технологию.

Теплопроводность ячеистого бетона зависит от его плотности и влажности. Теплоемкость составляет в среднем $0,84 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$.

По назначению и плотности ячеистые бетоны делят на три группы: *теплоизоляционные* с плотностью в высушенном состоянии не более 500 кг/м^3 ; *конструктивно-теплоизоляционные* (для ограждающих конструкций) — $500\ldots 900 \text{ кг/м}^3$; *конструкционные* (для железобетона) — $900\ldots 1200 \text{ кг/м}^3$.

Ячеистые бетоны применяют для легких железобетонных конструкций и теплоизоляции. Из них изготавливают панели наружных стен и покрытий зданий, неармированные стеновые и теплоизоляционные блоки, камни для стен. Для защиты от коррозии стальную арматуру в ячеистых бетонах покрывают цементно-битумной или цементно-полистирольной обмазкой.

Арболит — легкий бетон на минеральном вяжущем веществе и органических заполнителях. Вяжущими веществами служат обычный и быстротвердеющий портландцементы. Возможно применение гипсового и гипсоцементно-пуццоланового вяжущих веществ.

Органическим заполнителем является *дробленка*, получаемая в результате измельчения отходов заготовки и обработки древесных пород или отходов сельскохозяйственного производства (стебли хлопчатника, конопли, льна и др.). Дробленка должна иметь определенный зерновой состав, длина ее частиц не должна превышать 40 мм. Примесь коры, хвои и листьев в дробленке допускается до 5% (от массы сухой смеси заполнителей). Допускается применение смеси органического заполнителя с пористым или плотным минеральным заполнителем.

В качестве добавок при приготовлении бетонной смеси используют *минерализаторы* — хлорид кальция или жидкое натриевое стекло, которые нейтрализуют действие вредных водорастворимых древесных веществ (сахаристые вещества, смоляные кислоты) и ускоряют процесс твердения.

Основные свойства арболита:

- плотность в высушенном состоянии — 400...800 кг/м³;
- прочность при сжатии (марка), кг/см²:
для теплоизоляционных изделий и материалов — 5 и 10;
для конструкционно-теплоизоляционных изделий — 15, 25 и 35;
- модуль упругости — 75...1200 МПа;
- теплопроводность в высушенном состоянии — 0,07...0,16 Вт/(м · °С);
- водопоглощение — 50...60% (по массе);
- морозостойкость — 25...35 циклов;
- усадка — 2...4 мм/м.

Арболит применяют для изготовления теплоизоляционных материалов и конструкционно-теплоизоляционных изделий: стеновых блоков и панелей, плит перекрытий и покрытий, для возведения монолитных, армированных и неармированных конструкций производственных зданий различного назначения.

Отделку наружных поверхностей ограждающих конструкций из арболита производят слоем из декоративного бетона или раствора на минеральных заполнителях. Стальная рабочая арматура в конструкциях из арболита должна находиться в слое бетона или цементного раствора на плотных минеральных заполнителях толщиной не менее 15 мм.

Обширная сырьевая база в виде органических отходов делает арболит незаменимым при строительстве в отдаленных районах и сельской местности.

Бетоны с полимерами. Полимербетоны — композиционные материалы, получаемые на основе полимерного связующего вещества, минеральных заполнителей и наполнителей.

В качестве полимерного связующего вещества наиболее широко применяют фурановые, эпоксидные, полиэфирные и фенолоформальдегидные смолы. К минеральным наполнителям относятся порошки с размером частиц менее 0,15 мм, к заполнителям — песок с размером зерен до 5 мм и щебень с размером зерен до 50 мм. Наиболее высокие свойства имеют полимербетоны, в которых связующим веществом являются эпоксидные смолы.

По плотности различают *тяжелый конструкционный полимербетон* на тяжелых плотных заполнителях; *конструкционно-теплоизоляционный бетон* на минеральных заполнителях (например, керамзите) и *теплоизоляционный особо легкий бетон* на высокопористых заполнителях (пенопласте, пробке, древесине, вспученном перлите и т.п.).

Предел прочности полимерных бетонов плотной структуры при сжатии — 60...120 МПа, при растяжении — 7...20 МПа, а при изгибе — 12...40 МПа. При выдержке в воде прочность полимербетонов снижается. Ударная прочность фуранового полимербетона в 4—6 раз выше ударной прочности обычного бетона. Полимербетон обладает также лучшей прочностью при растяжении, высокой износостойкостью, меньшей хрупкостью, водонепроницаемостью и химической устойчивостью. Механические свойства полимербетона повышаются при армировании его стальной или стеклопластиковой арматурой. Полимерные бетоны хорошо склеиваются с цементными веществами, прочность сцепления приближается к прочности на растяжение цементного бетона.

Отрицательными свойствами полимербетонов являются горючесть, большая ползучесть, а также старение, усиливающееся при действии попеременного нагревания и увлажнения. Кроме того, необходимо соблюдение специальных правил охраны труда при работе с полимерами и кислыми отвердителями, которые могут вызвать ожоги; необходима хорошая вентиляция, а также обеспечение рабочих защитными очками и спецодеждой.

Полимербетоны применяют:

- для возведения износостойких покрытий ирригационных плотин и конструкций портовых сооружений;
- для изготовления плит, устройства химически стойких полов производственных зданий, сточных каналов, лотков и других конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред;

- для сооружения шахтных стволов, кольцевых коллекторов подземных сооружений, химически стойких и дренажных труб, траверс ЛЭП, контактных опор и других конструкций с высоким электросопротивлением.

Из стале- и стеклополимербетона изготавливают элементы шахтной крепи, опоры контактной сети, шпалы, коллекторные кольца.

Цементно-полимерные бетоны характеризуются наличием двух активных составляющих — минерального вяжущего и органического веществ. Вяжущее вещество с водой образует цементный камень, склеивающий частицы заполнителя в монолит. Полимер по мере удаления воды из бетона образует на поверхности пор, капилляров, зерен цемента и заполнителя тонкую пленку, которая обладает хорошей адгезией и способствует повышению сцепления между заполнителем и цементным камнем, улучшает монолитность бетона и работу минерального скелета под нагрузкой. В результате цементно-полимерный бетон приобретает особые свойства: повышенную по сравнению с обычным бетоном прочность на растяжение и изгиб, более высокую морозостойкость, хорошие адгезионные свойства, высокую износостойкость, непроницаемость. В то же время для этого бетона отмечается несколько повышенная деформируемость, а также снижение показателей прочности при водном хранении.

Композиционные материалы на основе бетонов. Железобетон — это композиционный материал, в котором монолитно соединены и совместно работают в конструкции стальная арматура и бетон.

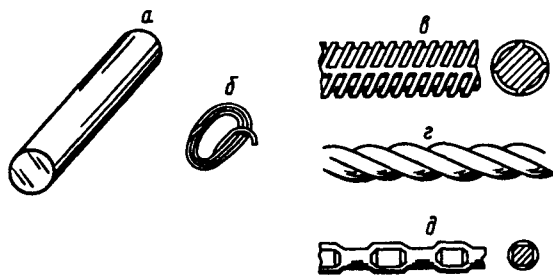
Стальной арматурой называют стальные стержни или каркасы и сетки, расположенные в массе бетона в соответствии с характером работы конструкции. Бетон предохраняет арматуру от коррозии.

Для армирования железобетонных конструкций применяют стержневую и проволочную арматурную сталь (рис. 75).

Стержневая арматура подразделяется на горячекатаную, не подвергаемую после проката упрочняющей обработке, и упрочненную термической обработкой или вытяжкой. В зависимости от основных механических характеристик (предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение после разрыва) и диаметра стержней она разделяется на классы. Ведущим показателем каждого класса является значение минимального предела текучести сталей, которое считается нормативным сопротивлением арматуры. Принятые обозначения классов стержневой арматуры (А) дополняются индексами для указания при необходимости способа изготовления, особых свойств или назначения.

Для классов А-1 и А-11 используют в основном углеродистые стали 3 и 5; для более высоких классов применяется низколегированная сталь различных марок. Стержневую арматуру класса А-1 изготавливают круглого сечения с гладкой поверхностью. Арматурные стали остальных классов имеют

Рис. 75. Виды арматуры:
а — гладкая стержневая; *б* — гладкая
 проволоочная; *в* — горячекатаная перио-
 дического профиля; *г* — проволоочные
 пряди; *д* — холодносплюснутая



периодический профиль (рис. 75, *в*), который позволяет обеспечить лучшее сцепление арматуры в бетоне.

Арматурную проволоку изготавливают способом холодного волочения в виде *гладкой проволоки* и *проволоки периодического профиля* диаметром 3...8 мм. Ее делят на классы (В), используя индекс «р» для указания на периодический профиль.

В железобетоне арматуру располагают так, чтобы она воспринимала растягивающие усилия, а сжимающие усилия передавались на бетон. Это обеспечивает высокую прочность материала при сжатии и растяжении. При этом различают *несущую* (основную) и *монтажную* (вспомогательную) *арматуру*. Несущая арматура располагается в местах изделия, в которых под нагрузкой возникают растягивающие напряжения. Монтажная арматура располагается в сжатых или ненапряженных участках.

Кроме этих видов арматуры применяют петли и крюки, необходимые для погрузочных работ, а также закладные части для крепления и связи сборных элементов между собой.

Совместная работа арматуры и бетона обусловливается хорошим сцеплением между ними и приблизительно одинаковыми температурными коэффициентами линейного расширения.

Сборные железобетонные изделия классифицируют *по виду армирования, плотности и виду бетона, внутреннему строению, назначению и области применения*.

По виду армирования различают *изделия с обычным армированием и предварительно напряженным армированием*.

Обычное армирование осуществляется с помощью плоских сеток и пространственных (объемных) каркасов, изготовленных из стальных стержней различного диаметра, сваренных между собой в местах пересечений. Такой вид армирования не предохраняет конструкции, работающие на изгиб или растяжение, от образования трещин, так как предельная растяжимость бетона в 5—6 раз меньше, чем стали.

В предварительно напряженном железобетоне арматуру предварительно растягивают, а после изготовления конструкции и затвердевания бетона ее освобождают от натяжения. При этом арматура сжимается и вызывает сжа-

тие бетона. В результате предельная растяжимость бетона в конструкции под действием эксплуатационной нагрузки как бы увеличивается, так как деформации от предварительного сжатия суммируются с деформациями растяжения. Величина предварительного сжатия бетона должна превышать напряжения растяжения, возникающие в нем при эксплуатации. К эффективным видам напрягаемой арматуры относятся стержневая арматура с классами более V, высокопрочная проволока и получаемые из нее арматурные канаты.

Для изготовления железобетонных конструкций бетон выбирается в зависимости от проектных требований. По плотности различают *тяжелый, облегченный, легкий* или *особо легкий бетон*. При этом используют различные виды бетона: тяжелые и легкие цементные, силикатные, ячеистые, химически стойкие, декоративные и другие бетоны. Разнообразие применяемых в строительстве бетонов позволяет выпускать сборные железобетонные изделия и конструкции самого различного назначения.

По внутреннему строению железобетонные изделия могут быть *сплошными, пустотелыми* и *комбинированными*, включающими элементы из других материалов. Изделия могут состоять из одного вида бетона — *однослойные*, из различных видов бетона — *многослойные*. В последнем случае иногда также применяют сочетание бетона с другими материалами, например теплоизоляционными или отделочными.

По назначению сборные железобетонные изделия выпускаются *для жилых, общественных, промышленных зданий, для сооружений сельскохозяйственного и гидротехнического строительства, а также общего назначения*. Они должны быть типовыми и унифицированными.

По форме сборные железобетонные изделия выполняются *линейными* (колонны, балки, прогоны и др.), *плоскостными* (плиты покрытий и перекрытий, панели стен и перегородок и др.), *блочными* (массивные изделия фундаментов, стены подвалов, ограждающих конструкций и др.) и *пространственными* (объемные элементы санитарных кабин, кольца колодцев и др.).

Марки бетонных и железобетонных сборных конструкций и изделий содержат обозначения основных характеристик последних и состоят из буквенно-цифровых групп, которые разделяются дефисами. Число групп должно быть не более трех. Марка записывается в одну строку.

Первая группа включается в марку всех бетонных и железобетонных сборных конструкций и изделий и содержит:

- обозначение типа и конструкции изделия по его наименованию (С — свая, К — колонны, Ф — фундаменты и др.);
- определяющие габаритные размеры (или обозначение типоразмера конструкции и изделия).

Во второй группе приводятся:

- несущая способность конструкции и изделия, указываемая цифрами, соответствующими расчетной нагрузке;
- класс напрягаемой арматуры в соответствии со стандартами и техническими условиями на арматурную сталь и с нормативными документами на проектирование железобетонных конструкций;
- вид бетона (Л — легкий, Я — ячеистый, С — плотный силикатный, М — мелкозернистый, Ж — жаростойкий).

В третью группу включены дополнительные характеристики, отражающие особые условия применения конструкций и изделий:

- стойкость бетона к воздействию агрессивной среды: Н — нормальная проницаемость; П — пониженная проницаемость; О — особо низкая проницаемость. Показатели бетона должны приниматься согласно СНиП 2.03.11–85;
- сейсмостойкость — для зданий и сооружений с расчетной сейсмичностью 7 баллов и выше обозначается буквой С;
- стойкость к воздействию повышенных и высоких температур — указывается классом жаростойкого бетона согласно ГОСТ 20910;
- конструктивные особенности — арабскими цифрами или строчными буквами указывается наличие дополнительных закладных изделий, отверстий, проемов, вырезов и т.п.

Железобетонные изделия должны иметь максимальную степень заводской готовности. По условиям транспортного и грузоподъемного оборудования длина сборных железобетонных изделий, как правило, не превышает 25 м, ширина — 3 м и масса — 25 т. Допускаемые отклонения от номинальных размеров типовых сборных конструкций устанавливаются стандартами и техническими условиями и обычно составляют $\pm 5...10$ мм.

Фибробетон — композиционный материал, в котором монолитно соединены и совместно работают в конструкции фибры различных волокон и бетон. Для армирования фибробетона могут применяться металлические и неметаллические (стеклянные, базальтовые, асбестовые и др.) волокна. В качестве фибр используют тонкую проволоку диаметром 0,1...0,5 мм, нарубленную на отрезки длиной 10...50 мм. Лучшие результаты обеспечивают фибры диаметром порядка 0,3 мм и длиной 25 мм.

Армирование фибрами применяется, как правило, для мелкозернистых бетонов; иногда армируют цементный камень. Эффективность применения волокон зависит от их содержания и расстояния между отдельными волокнами. Так, развитие в бетонах волосных трещин эффективно приостанавливается лишь при расстоянии между волокнами не более 10 мм, поэтому применение в бетоне крупного заполнителя,

не позволяющего расположить дисперсные волокна достаточно близко друг к другу, снижает эффективность подобного армирования.

Стальные фибры вводят в бетонную смесь обычно в количестве 1...2,5% объема бетона. В этом случае прочность бетона на растяжение повышается на 10...30% и резко повышаются его сопротивляемость ударам, предел усталости и износостойкость. При эксплуатации фибробетонов со стальными фибрами в условиях агрессивных сред фибры необходимо защищать специальными антикоррозионными покрытиями.

Стекланные волокна вводят в бетонную смесь в количестве 1...4% объема бетона. Как и стальные, стекланные волокна, обладая высоким модулем упругости, обеспечивают повышение прочности бетона на растяжение и его трещиностойкость. При использовании стекланных волокон необходимо предусматривать применение вяжущих веществ или специальные мероприятия, предохраняющие разрушение стекланных волокон в бетоне от коррозии, например использовать глиноземистые цементы, пропитку бетона полимером и др.

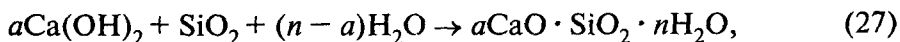
4.1.3.2. Силикатные материалы и изделия автоклавного твердения

Общие сведения. К силикатным материалам автоклавного твердения относятся материалы, получение которых основано на гидротермальном синтезе минеральной смеси (основное сырье, вяжущее вещество и заполнители), осуществляемом при повышенных значениях давления (до 1,5 МПа) и температуры (174...200°C) водяного пара.

В качестве основных сырьевых компонентов для материалов автоклавного твердения применяют преимущественно известково-песчаные смеси и промышленные отходы — доменные шлаки, топливные золы, нефелиновый шлам и др. Наиболее распространены известково-песчаные (*силикатные*) материалы.

Основным вяжущим компонентом материалов автоклавного твердения является известь. Для производства силикатных изделий рекомендуется применение быстрогасящейся извести с суммарным содержанием активных оксидов кальция и магния (активностью) более 70%. При этом содержание MgO должно быть не более 5%. Наряду с известью возможно применение портландцемента, в частности в производстве ячеистых бетонов, который способствует повышению морозостойкости изделий. Наиболее распространенный заполнитель силикатных материалов — кварцевые пески. При применении полевошпатовых и карбонатных песков физико-механические свойства изделий ухудшаются.

При тепловой обработке основных сырьевых компонентов в автоклавах идет взаимодействие между гидрооксидом кальция, кремнеземом и водой, сопровождающееся образованием труднорастворимых продуктов реакции — гидросиликатов кальция:



причем величина коэффициента a определяется соотношением концентраций CaO и SiO_2 в жидкой фазе.

Состав гидросиликатов кальция в зависимости от температуры и длительности тепловлажностной обработки может меняться от $(1,8...2,4) \times \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (1...1,25)\text{H}_2\text{O}$ и $(1,5...2) \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ до $(0,8...1,5) \times \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (0,5...2)\text{H}_2\text{O}$. Такие гидросиликаты обозначают, соответственно, $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$, C_2SH_2 и $\text{CSH}(\text{B})$. Гидросиликаты группы $\text{CSH}(\text{B})$ обеспечивают изделиям наиболее высокую прочность, группы $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ — наибольшие морозостойкость и стойкость против действия углекислоты воздуха.

Высокую реакционную способность при автоклавной обработке имеют аморфные и стеклообразные сырьевые материалы. К ним относятся вулканические эффузивные горные породы, гранулированные шлаки, топливные золы и др.

Интенсификация твердения и улучшение основных свойств автоклавных материалов достигаются применением высокодисперсных сырьевых материалов. При изготовлении высокопрочных известково-песчаных изделий негашеную известь размалывают с песком до удельной поверхности $3000...5000 \text{ см}^2/\text{г}$ и используют как вяжущее вещество.

По назначению изделия из силикатных материалов подразделяют на *конструкционные и теплоизоляционные изделия*, а по форме изготовления — на *штучные и крупноразмерные*.

По объему выпуска изделий из материалов автоклавного твердения ведущее место занимает *силикатный кирпич*, а за ним — *стеновые изделия* из плотного и ячеистого бетонов.

Силикатный кирпич — искусственный безобжиговый стеновой строительный материал, изготовленный прессованием из смеси кварцевого песка (90...92%) и гашеной извести (8...10%) с последующим твердением в автоклаве. В составе сырьевой смеси для получения силикатного кирпича содержание извести колеблется от 7 до 10% в пересчете на активную роль CaO . Для повышения прочности силикатного кирпича в качестве вяжущего компонента применяют тонкомолотые известково-кремнеземистые, известково-шлаковые и известково-зольные смеси.

При производстве силикатного кирпича наиболее желательны кварцевые пески с зернами размером $0,2...2 \text{ мм}$, имеющие минимальное количество пустот. Содержание глинистых примесей допускается не более 10%, так как при большем содержании увеличивается водопоглощение, снижаются прочность и морозостойкость кирпича. Наличие органических примесей в сырьевой смеси для производства кирпича снижает его прочность и может привести к образованию трещин за счет выделения газов при автоклавном твердении.

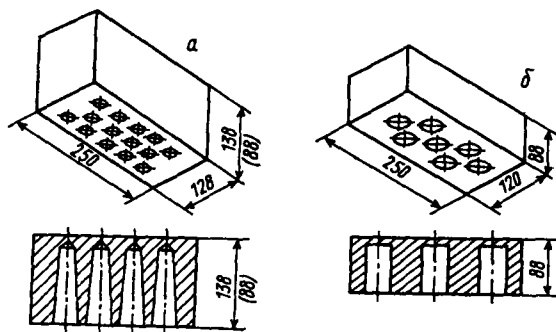


Рис. 76. Эффективные изделия:

a — камень (кирпич) 14-пустотный; пустотность 28...31%, диаметр отверстий 30...32 мм;
б — камень (кирпич) 11-пустотный; пустотность 22...25%, диаметр отверстий 27...32 мм

Промышленностью выпускаются *одинарный* и *модульный силикатные кирпичи*, а также *силикатные камни*. По теплотехническим свойствам и средней плотности в сухом состоянии силикатный кирпич и силикатные камни подразделяют на три группы:

- *эффективные* (рис. 76), позволяющие уменьшать толщину ограждающих конструкций по сравнению с толщиной стен, выложенных из полнотелого кирпича; к этой группе относят кирпич плотностью не более 1400 кг/м^3 , камни плотностью не более 1450 кг/м^3 и теплопроводностью до $0,46 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;

- *условно-эффективные* (рис. 77), улучшающие теплотехнические свойства ограждающих конструкций без снижения их толщины; к этой группе относят кирпич плотностью $1401...1650 \text{ кг/м}^3$, камни плотностью $1451...1650 \text{ кг/м}^3$ и теплопроводностью до $0,58 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;

- *обыкновенный силикатный кирпич* плотностью свыше 1650 кг/м^3 .

По механическим свойствам силикатный кирпич близок к керамическому кирпичу, но менее огнестоек. В зависимости от предела прочности при сжатии силикатные камни и кирпич подразделяют на марки 300, 250, 200, 150, 125, 100, 75. Для кирпича нормируется также предел прочности при изгибе. Водопоглощение силикатных кирпича и камней должно быть не более 6%. По морозостойкости силикатные кирпич и камни могут иметь марки F 50, F 35, F 25 и F 15.

Силикатные кирпич и камни, которым присвоена высшая категория качества, должны удовлетворять дополнительно следующим требованиям: марка по прочности должна быть не менее 125 для рядовых и 150 — для лицевых изделий; марка по морозостойкости должна быть не менее F 25 для рядовых и F 35 — для лицевых изделий.

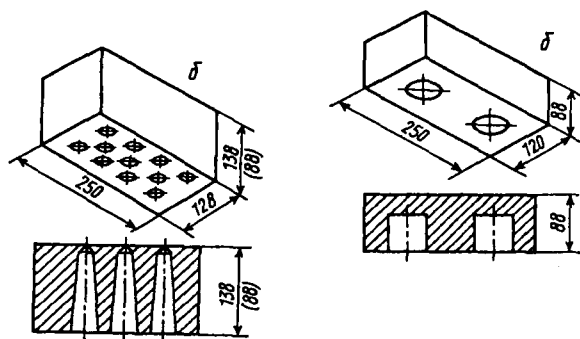


Рис. 77. Условно-эффективные изделия:

- а — утолщенный 7-пустотный кирпич; пустотность 16...18%, диаметр отверстий 30...36 мм;
 б — утолщенный 2-пустотный кирпич; пустотность 8...10%, диаметр отверстий 50...60 мм

Силикатные кирпич и камни применяют наряду с керамическим кирпичом для кладки каменных и армированно-каменных наружных и внутренних конструкций в надземной части зданий с нормальным и влажным режимом эксплуатации. Вследствие более низкой стойкости к воде и к растворенным в ней веществам силикатный кирпич, в отличие от керамического, нельзя применять для кладки фундаментов и цоколей зданий ниже гидроизоляционного слоя. Нельзя использовать силикатный кирпич для стен зданий с мокрым режимом эксплуатации (бань, прачечных и др.) без специальных мер защиты стен от увлажнения. В этих конструкциях можно применять силикатный кирпич только повышенной морозостойкости (F 50). Силикатный кирпич не разрешается использовать для кладки печей и труб, так как он не выдерживает длительного воздействия высокой температуры.

Силикатные бетоны — затвердевшая в автоклаве, уплотненная смесь, состоящая из кварцевого песка (70...80%), молотого песка (8...15%) и молотой негашеной извести (6...10%). На прочность силикатного бетона, как и обычного, существенно влияет не только содержание вяжущего вещества и молотого песка, но и однородность смеси, степень ее уплотнения, водосодержание, качество извести и песка, режим автоклавной обработки и др. Модуль упругости мелкозернистого силикатного бетона на 30%, а ползучесть — в 1,5—2 раза ниже аналогичных показателей равнопрочного цементного бетона нормального твердения при той же крупности заполнителя. Коррозионная стойкость его арматуры также более низкая, что обусловлено слабой щелочностью среды. Стойкость арматуры надежно обеспечивается при влажности воздуха до 60%.

Как и цементные, силикатные бетоны классифицируются в зависимости от плотности, особенностей структуры, максимальной крупности и вида заполнителей, а также от области применения. Силикатные бетоны могут быть *тяжелыми (плотными)*, *легкими* и *ячеистыми*.

Тяжелые силикатные бетоны представляют собой группу бетонов автоклавного твердения на основе известково-кремнеземистого вяжущего и минеральных заполнителей. Для получения тяжелых силикатных изделий применяют известь с удельной поверхностью 4000...5000 см²/г, а песок — 2000...2500 см²/г. Для силикатных изделий с прочностью до 10...15 МПа песок можно применять в немолотом виде при содержании извести 6...10%.

Наибольшее распространение получили тяжелые мелкозернистые бетоны плотностью 1800...2500 кг/м³. По прочности при сжатии установлены следующие марки тяжелого силикатного бетона, кг/см²: 100, 150, 200, 250, 300 и 400. На основе известково-кремнеземистых вяжущих веществ можно получить бетоны и более высокой прочности — до 80 МПа.

Водостойкость тяжелого силикатного бетона удовлетворительная (коэффициент размягчения не ниже 0,75), хотя и несколько ниже водостойкости цементного бетона. Морозостойкость при низкой формовочной влажности и вибрационном уплотнении достигает 200 и более циклов.

Тяжелые силикатные бетоны успешно применяются для изготовления мелких изделий и крупноразмерных армированных несущих конструкций для жилищного, промышленного и сельского строительства (панели внутренних стен и перекрытий, лестничные марши и площадки, балки, прогоны и колонны, карнизные плиты и т.д.). Не рекомендуется использовать тяжелые силикатобетонные изделия для фундаментов и других конструкций, работающих в условиях высокой влажности.

В последнее время тяжелые силикатные бетоны применяют для изготовления высокопрочных изделий: пресованного безасбестового шифера, напряженно-армированных силикатобетонных железнодорожных шпал, армированных силикатобетонных тюбингов для отделки туннелей метро и для шахтного строительства (бетон прочностью 60 МПа и более).

Легкие силикатные бетоны — разновидность силикатного бетона на пористых заполнителях. Вяжущие вещества для этих бетонов применяют те же, что и для тяжелых бетонов, а пористыми заполнителями служат керамзит, вспученный перлит, аглопорит, шлаковая пемза и другие пористые материалы в виде гравия и щебня.

Из легкого силикатного бетона изготавливают крупные стеновые блоки внутренних несущих перегородок, ступени, плиты, балки. Элементы, работающие на изгиб, армируют стержнями и сетками.

Ячеистые силикатные бетоны — искусственные каменные материалы, получаемые на основе минерального вяжущего автоклавного твердения, с равномерно распределенными порами в виде сферических ячеек, диаметр которых обычно составляет 1...3 мм. Ячеистая структура

этого бетона достигается введением в смесь газообразующей добавки (*газосиликатов*) или пены (*пеносиликатов*).

Для производства указанных бетонов применяют известково-кремнеземистые вяжущие вещества, в которых с целью более быстрого формирования структуры и нарастания прочности известь частично заменяют портландцементом. В качестве газообразователя используют водную суспензию алюминиевой пудры, пенообразователя — клееканифольные, смолосапониновые и некоторые другие вещества.

Для регулирования процесса структурообразования, увеличения прочности и ускоренного твердения ячеистобетонной смеси используют химические добавки: гипс, поташ, соду, сульфатол и др. Теплопроводность ячеистых силикатных бетонов в сухом состоянии при температуре 1°C зависит от плотности и колеблется в пределах $0,093...0,26 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ при соответствующих значениях плотности $300...1000 \text{ кг/м}^3$.

Водопоглощение силикатных ячеистых бетонов составляет $40...45\%$. При применении портландцемента оно снижается до $30...35\%$. У бетонов, используемых в ограждающих конструкциях, коэффициент паропроницаемости должен быть не ниже $4,73...2,95 \text{ кг/(м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па)}$ при плотности, изменяющейся, соответственно, в пределах $500...1000 \text{ кг/м}^3$. По морозостойкости указанные бетоны могут быть следующих марок: F 15, F 25, F 35, F 50, F 75, F 100.

При высыхании бетонов наблюдается усадка, достигающая 5 мм/м при твердении в естественных условиях в возрасте 10 мес. при плотности $600...800 \text{ кг/м}^3$.

В зависимости от назначения силикатные ячеистые бетоны делятся на следующие группы:

- *конструкционные* с плотностью в сухом состоянии $900...1200 \text{ кг/м}^3$ и пределом прочности при сжатии $7,5...15 \text{ МПа}$;
- *конструкционно-теплоизоляционные* с плотностью $500...900 \text{ кг/м}^3$ и пределом прочности при сжатии $2,5...7,5 \text{ МПа}$;
- *теплоизоляционные* с плотностью менее 500 кг/м^3 и пределом прочности при сжатии менее $2,5 \text{ МПа}$.

Из силикатных ячеистых бетонов марок $25...100$ изготавливают панели наружных стен, ограждающих конструкций зданий (за исключением помещений с мокрым режимом эксплуатации, цоколей и стен подвалов). Фасадная поверхность таких панелей должна иметь защитно-декоративную отделку. Эти бетоны применяют также при изготовлении панелей внутренних несущих стен, перегородок, междуэтажных и чердачных перекрытий жилых и общественных зданий, стеновых камней, плит покрытий и других изделий.

При армировании изделий из ячеистых бетонов принимают меры для надежной защиты арматуры и закладочных деталей от коррозии (нанесение антикоррозионных покрытий, создание достаточного защитного слоя).

Изделия и конструкции из этих бетонов по массе, стоимости и капитальным вложениям эффективнее изделий из легких бетонов на пористых заполнителях.

4.1.3.3. Строительные растворы

Строительный раствор — это искусственный камневидный материал, полученный в результате твердения растворной смеси, состоящей из вяжущего вещества, воды, мелкого заполнителя и добавок, улучшающих свойства смеси и растворов. Крупный заполнитель отсутствует, так как раствор применяют в виде тонких слоев (шов каменной кладки, штукатурка и др.). Требования к качеству вяжущих веществ, заполнителей, добавок и воды такие же, как и к материалам, применяемым для приготовления бетонов.

В качестве вяжущего вещества используют цемент, глину, гипс, известь или их смеси. Строительные растворы, приготовленные на одном вяжущем материале, называются *простыми*, а на нескольких вяжущих веществах — *сложными растворами*.

Составы простых растворов обозначают двумя числами, которые показывают соотношение объемных частей вяжущего материала и заполнителя. Для сложных растворов соотношение состоит из трех чисел, соответствующих объемным частям основного и дополнительного вяжущих веществ и заполнителя. Например, состав 1 : 0,15 : 4 известково-гипсового раствора представляет собой одну часть извести, 0,15 гипса и четыре части заполнителя.

В качестве мелкого заполнителя применяют природные пески — кварцевые, полевошпатовые, а также искусственные дробленые пески — из плотных и пористых горных пород и искусственных материалов (пемзовые, керамзитовые, перлитовые и др.).

Для обычной кладки кирпича, камней правильной формы, в том числе и блоков, наибольший размер зерен песка не должен превышать 2,5 мм; для бутовой кладки и песчаного бетона — не более 5 мм; для отделочного слоя штукатурки — не более 1,2 мм.

Неорганические (известь, зола ТЭС, молотый доменный шлак и др.) и органические (например, омыленный древесный пек) добавки вводят в растворные смеси, чтобы сохранить их *удобоукладываемость*. Органические добавки не только улучшают удобоукладываемость растворных смесей, но также экономят вяжущее вещество, повышают морозостойкость, снижают водопоглощение и усадку строительного раствора.

Удобоукладываемость — это свойство растворной смеси легко укладываться плотным и тонким слоем на пористое основание и не расслаиваться при хранении, перевозке и перекачивании раствора насосами.

Строительные растворы различают в зависимости от вида вяжущего вещества, средней плотности, механических свойств и назначения.

По виду вяжущего вещества различают растворы *цементные, известковые, гипсовые и смешанные* (цементно-известковые, цементно-глиняные, известково-гипсовые и др.). В дорожном строительстве и при специальных работах (устройство стяжек, защитных антикоррозионных слоев) находят применение *битумные и полимерные вяжущие вещества*.

По средней плотности различают *тяжелые растворы* плотностью более 1500 кг/м^3 , изготавливаемые обычно на кварцевом песке; *легкие растворы* плотностью менее 1500 кг/м^3 , изготавливаемые на пористом мелком заполнителе (с плотностью менее 1200 кг/м^3) и с порообразующими добавками.

По механическим свойствам растворы классифицируются по двум важнейшим показателям: *прочности и морозостойкости*, характеризующим долговечность раствора.

Строительные растворы для кладки и штукатурки по прочности на сжатие в 28-суточном возрасте делят на следующие марки, кг/см^2 : 4; 10; 25; 50; 75; 100; 150; 200. Строительные растворы марок 4 и 10 изготавливают на местных вяжущих веществах (воздушной и гидравлической извести и др.). Прочность растворов на растяжение в 5—10 раз меньше их прочности на сжатие. Морозостойкость растворов зависит от вида вяжущего вещества, водоцементного отношения, введенных добавок и условий твердения. Строительные растворы для каменной кладки наружных стен и наружной штукатурки имеют марки по морозостойкости: F 10; F 15; F 25; F 35; F 50. Для влажных условий эксплуатации растворы должны иметь более высокие марки по морозостойкости: F 100; F 150; F 200 и F 300.

По назначению строительные растворы различают как:

- *кладочные* — для каменной кладки стен, фундаментов, столбов, сводов и других конструкций;
- *штукатурные* — для оштукатуривания внутренних стен, потолков, фасадов зданий;
- *монтажные* — для заполнения швов между крупными элементами (панелями, блоками и др.) при монтаже зданий и сооружений из готовых сборных конструкций и деталей;
- *специальные* (декоративные, гидроизоляционные, тампонажные, рентгенозащитные, акустические и другие строительные растворы).

4.2. Каменные плавленые материалы (каменное литье)

Каменные плавленые материалы (каменное литье) — искусственные силикатные материалы, получаемые плавлением ($1350...1450^\circ\text{C}$) горных пород или шихты из них, разливкой расплава в формы с последующей

термической обработкой, включающей кристаллизацию и отжиг при температурах 900...1000°C. Исходным сырьем для этих материалов являются основные (например, базальт) и карбонатные горные породы. Выбор того или другого вида сырья определяет кроме свойств цвет получаемого материал. Основные породы обеспечивают темный цвет каменного литья, а карбонатные породы — светлый.

В состав плавленных каменных материалов входят основное (исходное) сырье и добавки. Добавки по характеру воздействия делят на *технологические* (например, плавни), обеспечивающие понижение температуры плавления и уменьшающие вязкость, и *минерализаторы* (хромит, магнезит и др.), ускоряющие процесс кристаллизации и способствующие созданию мелкозернистой, однородной структуры.

Свойства плавленных каменных материалов: плотность — 2900...3000 кг/м³; пористость — 1...2%; $\sigma_{сж} = 200...240$ МПа, $\sigma_{изг} = 40...50$ МПа; истираемость — 0,7 г/см² (в 2—5 раз выше, чем у гранита и базальта); высокие диэлектрические свойства; химическая и коррозионная стойкость; термостойкость; морозостойкость; армируемость и свариваемость.

Из этих материалов изготавливают брусчатку для мощения дорог, облицовочную плитку, мелющие тела, трубы, диэлектрические изделия и др. На химических заводах в качестве футеровки для травильных ванн, всевозможных отстойников применяют изделия из каменного литья (минеральная вата, базальтовое супертонкое волокно и др.).

Минеральная вата — тонкие стекловидные волокна диаметром 5...15 мкм, получаемые из расплава легкоплавких горных пород (мергелей, доломитов, базальта и др.). Структура ваты представляет собой стекловидные волокна и различные неволоконистые включения в виде капель силикатного расплава и микроскопических обломков волокон. Длина волокон в зависимости от способа производства — 2...60 мм. В массе должно содержаться до 80...90% тонкого волокна диаметром менее 7 мкм, содержание волокон диаметром свыше 15 мкм допускается не более 7 %.

Минеральную вату в зависимости от плотности выпускают трех марок: 75, 100 и 125. Теплопроводность — 0,042...0,046 Вт/(м·К), теплостойкость — не менее 600°C.

На основе минеральной ваты выпускают теплоизоляционные штучные, рулонные, шнуровые изделия и сыпучие (рыхлые, волоконистые) материалы. Ее можно применять при температуре изолируемых поверхностей от -200 до +600°C. К недостаткам минеральной ваты следует отнести большие потери материала при перевозках и хранении на уплотнение, комкуемость, превращение в пыль части волокон. Эти недостатки частично или полностью устраняются при переработке ее в минераловатные изделия: маты, полужесткие и жесткие плиты, а также скорлупы, сегменты, цилиндры и др.

Акмигран — декоративно-акустические плиты, изготавливаемые из гранулированной минеральной ваты (76...80%), крахмала (10...12%) и бентонитовой глины (10...15%). Плиты имеют красивый вид и являются эффектив-

ным звукопоглощающим материалом с коэффициентом звукопоглощения 0,8...0,9 при среднем и высоком диапазонах частот.

Базальтовое супертонкое волокно производят очень малой плотности — 17...25 кг/м³. Оно обладает низкой теплопроводностью — 0,027...0,037 Вт/(м · К), высоким звукопоглощением — 0,15...0,95 в диапазоне частот 100...4000 Гц и используется при температуре эксплуатации от –200 до +700°С.

Каменные плавленые материалы могут быть получены при использовании в качестве исходного сырья металлургических и топливных шлаков, золы ТЭС. Так, широкое распространение получила *шлаковая вата*.

Шлаковая вата (шлаковата) представляет собой искусственный материал, состоящий из тончайших волокон, получаемых из расплавленных доменных шлаков или других минеральных расплавов, у которых модуль кислотности больше единицы. Изделия из шлаковой ваты представляют собой маты с плотностью 250...300 кг/м³ и теплопроводностью 0,05 Вт/(м · К), которые с успехом применяются для утепления всевозможных ограждающих строительных конструкций.

4.3. Неорганические полимерные материалы

Основой *неорганических полимерных материалов* являются главным образом оксиды и бескислородные соединения металлов. Эти материалы характеризуются негорючестью, высокой стойкостью к нагреву, химической стойкостью. Они не подвержены старению, обладают большой твердостью и хорошей сопротивляемостью сжимающим нагрузкам. Наряду с этим неорганические полимерные материалы обладают повышенной хрупкостью, плохо переносят резкую смену температур, слабо сопротивляются растягивающим и изгибающим усилиям, имеют большую плотность по сравнению с органическими полимерными материалами.

4.3.1. Графитовые материалы

Графит — неорганический полимерный материал, кристаллическая решетка которого образована параллельными слоями гексагональных сеток. Между атомами углерода внутри этих сеток существует ковалентная связь, а между слоями — вандерваальсово взаимодействие. Графит имеет слоистую структуру.

По происхождению различают *природные и искусственные графиты*. Источником природных графитов являются минералы.

Природный графит — минерал, наиболее распространенная и устойчивая в земной коре гексагональная полиморфная модификация углерода метаморфического, магматического происхождения. Он представляет собой темно-серые до черных чешуйчатые агрегаты, конкреции, сплошные массы. Структура слоистая.

Характерные свойства природного графита:

- теоретическая плотность — 2265 кг/м^3 ;
- температура сублимации — 3700°C . Графит сублимирует, минуя стадию плавления, с затратой значительной тепловой энергии на этот процесс (жидкое состояние углерода может быть достигнуто лишь при 4000°C и давлении выше 10 МПа);
- анизотропия — $3 : 1 \dots 100 : 1$;
- высокая теплопроводность;
- низкий коэффициент линейного расширения, незначительно возрастающий с повышением температуры;
- высокая жаропрочность и устойчивость к тепловым ударам;
- твердость по шкале Мооса: по оси симметрии $6-1$; перпендикулярно оси симметрии $6-5,5$;
- легко обрабатываемый;
- хрупкий;
- хорошие антифрикционные свойства ($f = 0,28$);
- высокая электропроводность;
- степень черноты — $0,7 \dots 0,9$;
- склонность к окислению, начиная с температур $400 \dots 800^\circ\text{C}$, с выделением газообразных продуктов.

Для оценки твердости минералов используют *десятибалльную шкалу относительной твердости Мооса*. Относительная твердость по этому методу определяется путем царапания исследуемого минерала острыми краями эталонных материалов (или наоборот). Условные единицы шкалы Мооса соответствуют следующим минералам-эталонам: 1 — тальк, 2 — гипс, 3 — кальцит, 4 — флюорит, 5 — апатит, 6 — ортоклаз, 7 — кварц, 8 — топаз, 9 — корунд, 10 — алмаз.

Качество природных графитов невысокое; они содержат много примесей, пористы, свойства почти изотропны. Поэтому их применяют лишь в качестве антифрикционного материала и в электротехнике. Используется также природный графит в металлургии (плавильные тигли, литейные формы, противопожарные краски), в химическом машиностроении (футеровочный материал, трубы и др.), при изготовлении электродов, щелочных аккумуляторов, карандашей и др.

Графит, предназначенный для изготовления активных масс щелочных аккумуляторов и масс для графитизированных антифрикционных изделий из цветных металлов, выпускается следующих марок: ГАК-1 — для аккумуляторных изделий специального назначения; ГАК-2, ГАК-3 — для изготовления активных масс щелочных аккумуляторов и масс графитизированных антифрикционных изделий из цветных металлов.

Искусственные графиты делят по виду исходного сырья на *технические* (ПРОГ, ПГ-50) и *пиролитические* (*пирографиты*). Для получения технических графитов используется твердое сырье, например нефтяной кокс с каменноугольным пеком в качестве связующего. Пирографиты получают из газообразного сырья (например, метана и др.).

Искусственные графиты обладают совершенным кристаллическим строением, высокой анизотропией свойств (коэффициенты теплопроводности пирографита вдоль и поперек слоев, соответственно, равны 372 и 1,16...3,5 Вт/(м·К)) и являются высокотемпературным конструкционным материалом. Для этих графитов характерно увеличение прочности и модуля упругости при нагреве. До температур 2200...2400°C прочность технического графита повышается на 40...60% и лишь при дальнейшем нагреве начинает снижаться. При температуре выше 1700°C появляется ползучесть. Удельная прочность при нагреве сохраняется высокой (для пирографита $\sigma/\rho_0 = 1,1 \cdot 10^4$ м).

Конкретные свойства искусственных графитов зависят от технологии получения, плотности, степени окисления, ориентации кристаллов и др. Свойства искусственных графитов приведены в табл. 10.

Среди способов воздействия на свойства графитов можно выделить три основные группы:

- 1) легирование (Nb, Ta, Si) с целью создания мелкозернистой структуры, обеспечивающей высокую твердость и прочность материала;
- 2) химико-термическая обработка — силицирование;
- 3) покрытие керамикой.

Графит применяют в эксплуатируемых при высоких температурах конструкциях летательных аппаратов и двигателей, в энергетических ядерных реакторах в качестве антифрикционного материала и в виде углеграфитовых изделий. Графит может применяться и как проводник тепла, и как теплоизолятор.

4.3.2. Асбестовые материалы и изделия

4.3.2.1. Асбестовые материалы

Для получения асбестовых материалов используют главным образом хризотил-асбест и в меньшей степени амфиболовые асбесты. Промышленность выпускает их в виде порошков, а также листов и рулонов из асбестового волокна; иногда вводят наполнитель и небольшое количество склеивающих веществ (крахмала, казеина и др.), получая асбестовую бумагу, картон, шнур. Волокна асбеста, вводимые в битумно-резиновое вяжущее вещество, могут играть роль дисперсной арматуры.

Таблица 16

Свойства искусственных графитов

Вид графита	Объемная масса, кг/м ³	Пористость, %	Предел прочности, МПа			Модуль упругости, ГПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-4}$, °С ⁻¹
			при растяжении	при сжатии	при изгибе			
ПРОГ	1640	24	$\frac{10,2}{5}$	$\frac{50,3}{47}$	$\frac{17}{6,1}$	$\frac{8,75}{6,1}$	$\frac{—}{3,56}$	$\frac{1,9-5}{—}$
ПГ-50	1020	52	$\frac{3,8}{5,2}$	$\frac{11,6}{11,6}$	$\frac{7,5}{8}$	$\frac{1,7}{—}$	—	—
Пирографит	1920—2200	1,5	$\frac{—}{114-133}$	$\frac{460-485}{105-150}$	$\frac{—}{105}$	При сжатии $\frac{112}{70}$	$\frac{1,16-3,5}{372}$	$\frac{23,500}{0,0225}$

Примечание. В числителе приведены свойства графита в перпендикулярном направлении, в знаменателе — свойства в продольном направлении.

Асбестодиатомитовый порошок — смесь асбеста (15%) и молотого диатомита или трепела (85%), иногда с добавками других веществ (отходов асбестоцементных заводов, слюды). Плотность теплоизоляции 450...700 кг/м³ при теплопроводности 0,093...0,21 Вт/(м · К).

Совелитовый порошок — смесь легкого основного карбоната магния и карбоната кальция с асбестом, применяемая при температурах до 500°C. Готовая совелитовая теплоизоляция имеет плотность 450 кг/м³ и теплопроводность не более 0,098 Вт/(м · К).

Асбестомagneзиальный порошок (ньювель) готовят в виде смеси легкого основного карбоната магния с асбестом и применяют для теплоизоляции при температурах до 350°C. Выпускают в виде порошка для теплоизоляционной засыпки, приготовления мастики, а также изготовления плит, скорлуп, сегментов.

Асбестовый картон получают из асбеста (65%), каолина (30%) и крахмала (5%) на листопрокатных агрегатах в виде листов длиной и шириной 900...1000 мм и толщиной 2...10 мм. Плотность 1000...1400 кг/м³, теплопроводность в сухом состоянии 0,157 Вт/(м · К), предел прочности при растяжении — не менее 0,6 МПа, влажность — не более 3% по массе. Используют как огнестойкий теплоизоляционный материал.

Асболокниты получают пропиткой асбеста фенолоформальдегидной смолой. Они обладают высокими ударопрочностью, тепло- (свыше 200°C) и химической стойкостью, фрикционными свойствами и применяются для изготовления элементов тормозов (накладки, колодки, диски подъемно-транспортных устройств, автомобилей и др.), кислотоупорных конструкций (аппараты, ванны, трубы и др.).

Асботекстолит — материал, получаемый пропиткой асбестовой ткани полимерным связующим веществом (до 38...43%). Наиболее высокой теплоустойкостью (до 300°C) обладает материал на кремнийорганическом связующем веществе, а механическая прочность выше у фенольных асботекстолитов. По назначению асботекстолит является конструкционным, фрикционным ($f = 0,3...0,38$ — без смазки и $f = 0,05...0,07$ — со смазыванием маслом) и термоизоляционным материалом. Из асботекстолита делают лопатки ротационных бензонасосов, фрикционные диски, тормозные колодки и др.

Бризол изготавливают, прокатывая массу, полученную смешиванием нефтяного битума, дробленой резины (от изношенных автопокрышек), асбестового волокна и пластификатора. Бризол стоек до 60°C к серной и соляной кислотам при концентрациях, соответственно, до 40 и 20%. Его применяют для защиты от коррозии подземных металлических конструкций и трубопроводов, приклеивая к поверхности битумной мастикой.

Изол — бесосновный рулонный гидроизоляционный и кровельный материал, изготавливаемый прокаткой резиново-битумной композиции, полученной термомеханической обработкой девулканизированной резины, нефтяного битума, минерального наполнителя (волокон асбеста), антисептика и пластификатора. Изол отличается повышенной эластичностью, биостоек, незначительно поглощает влагу, долговечнее рубероида более чем в 2 раза.

Изол применяют для гидроизоляции гидротехнических сооружений, бассейнов, резервуаров, подвалов, антикоррозионной защиты трубопроводов, покрытия двух- и трехслойных пологих и плоских кровель. Приклеивают изол холодной или горячей мастикой с тем же названием.

Гидроизол — гидроизоляционный рулонный беспокровный асбестовый картон, пропитанный нефтяным битумом. Гидроизол по водонепроницаемости, водопоглощению и величине разрывного груза при растяжении полосы шириной 50 мм выпускают двух марок: ГИ-Г и ГИ-К. Он предназначен для устройства гидроизоляционного слоя в подземных и гидротехнических сооружениях, а также для защитного противокоррозионного покрытия.

Низкие сорта волокон, пыль, а также тонко измельченный асбест применяют в малярных работах для приготовления выравнивающих составов, огнестойких красок и в качестве наполнителя в масляных, цементных, эмульсионных, силикатных и других красках. В шпатлевках асбест служит армирующим материалом.

4.3.2.2. Асбестоцементные изделия

Асбестоцемент — композиционный искусственный камневидный материал, получаемый в результате твердения смеси, состоящей из цемента, воды и асбеста, который в асбестоцементе армирует цементный камень, обеспечивая высокую прочность изделий при растяжении и изгибе. При производстве цветных асбестоцементных изделий в асбестоцементную смесь добавляют красители.

Для асбестоцементных изделий марок 400 и 500 в качестве вяжущего вещества используют специальный портландцемент, а также песчанистый с добавлением молотого песка и белый портландцементы.

Для производства асбестоцементных изделий применяют 3, 4, 5 и 6-й сорта асбеста с длиной волокон от 10 мм и менее до нескольких сотых, содержание которых составляет 50...24% по массе. Остальные 50...76% приходятся на долю пылевидных и других неволоконистых частиц. В некоторых случаях 10...15% асбеста заменяют базальтовой минеральной ватой или шлаковой ватой.

Как правило, в асбестоцементную суспензию вводят добавки (пластификаторы, гидрофобизаторы, пигменты и др.), которые улучшают ее технологические свойства и повышают качество изделий.

Механические свойства асбестоцемента зависят от содержания асбестового волокна и его качества (длины и диаметра волокон), активности цемента, плотности асбестобетона, условий твердения и др. При плотности 1600...1800 кг/м³ асбестоцемент имеет пределы прочности выше пределов прочности цементного камня: при растяжении в 3—5 раз — 8,8...11,2 МПа; при изгибе в 2—3 раза — 17,2...24,5 МПа.

Асбестоцемент отличается высокой предельная растяжимость — $8...16 \cdot 10^4$, превышающая растяжимость цементного камня в 6—10 раз. Теплопроводность при плотности 1900 кг/м^3 и естественной влажности составляет $0,35 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Предельная температура применения асбестоцементных изделий на портландцементе 250°C , но значительное снижение прочности наступает после нагрева до $400...500^\circ\text{C}$. Однако при использовании вяжущего вещества с кремнеземистыми добавками можно получить изделия, выдерживающие температуру 1000°C .

Асбестоцемент имеет малую электропроводность, стойкость против выщелачивания минерализованными водами, высокую огнестойкость, водонепроницаемость, коррозионную стойкость и морозостойкость. Морозостойкость и долговечность асбестоцемента зависят от его плотности. Так, при плотности 1650 кг/м^3 морозостойкость — 50 циклов, а при 1800 кг/м^3 — 100 циклов.

Асбестоцемент легко пилится, сверлится и шлифуется. К недостаткам его относятся хрупкость, пониженная прочность при насыщении водой и склонность к короблению. Эти недостатки устраняются технологическими (введение добавок, автоклавная обработка, прессование, армирование) и конструктивными методами.

Асбестоцементные изделия подразделяют *по способу их изготовления и по назначению*. В зависимости от способа изготовления они выпускаются в виде листов, панелей, плит, труб и фасонных изделий. По назначению различают *строительные асбестоцементные* (кровельные, стеновые, облицовочные, для элементов строительных конструкций) и *электротехнические асбестоцементные изделия*.

Защиту от влаги и необходимые декоративные свойства листам, предназначенным для облицовки стен и панелей санитарных узлов и кухонь, обеспечивают покраской водонепроницаемыми лаками, эмалями и смолами. Внутренние поверхности асбестоцементных газопроводных труб для снижения утечки газа обязательно покрывают смолами.

4.3.3. Слюдяные материалы

Слюдяные электроизоляционные материалы состоят из листов слюды, склеенных с помощью какой-либо смолы или клеящего лака. Основная область применения клееных слюдяных материалов — изготовление изоляции, обмоток электрических машин высокого напряжения (генераторы, электродвигатели), а также машин низкого напряжения нагревостойкого исполнения и машин, работающих в тяжелых условиях эксплуатации.

К клееным слюдяным материалам относятся *миканиты, микафолий, микаленты и микаполотно*.

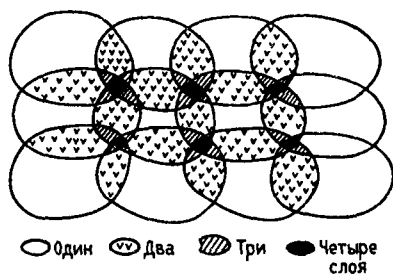


Рис. 78. Раскладка щипаной слюды в один слой при получении миканитов

Миканиты представляют собой твердые или гибкие листовые материалы, получаемые склеиванием (рис. 78) с последующим прессованием листочков щипаной слюды (мусковит, флогопит или их смеси) с помощью шеллачной, глифталевых, крем-

нийорганических и других смол или лаков на основе этих смол.

Основные виды миканитов — *коллекторные, прокладочные, формовочные и гибкие*. Коллекторный и прокладочный относятся к группе твердых миканитов, которые после склейки слюды подвергаются прессованию при повышенных удельных давлениях и нагреве (150...160°C). Состав твердых миканитов после обработки: 80...95% слюды и 20...5% клеящего вещества. Эти миканиты обладают меньшей усадкой по толщине и имеют большую плотность. Формовочный и гибкий миканиты имеют более рыхлую структуру и обладают меньшей плотностью.

В марках миканита первая буква указывает на его назначение (К — коллекторный, П — прокладочный, Ф — формовочный, Г — гибкий); вторая — на тип используемой слюды (М — мусковит, Ф — флогопит, С — смесь слюды); третья — тип смол для твердых миканитов (Г — глифталевая смола, Ш — шеллачная смола, К — кремнийорганическая смола) или лаков для гибкого (С — светлый масляно-глифталевый лак, Ч — черный масляно-битумный). Четвертая буква показывает: А — пониженное содержание клеящего вещества для твердых миканитов; О — миканит, оклеенный специальной бумагой для гибких миканитов.

Микафолый — рулонный или листовой электроизоляционный материал, формируемый в нагретом состоянии. Изготавливается из одного или нескольких (двух-трех) листочков слюды (мусковит или флогопит), склеенных между собой и с полотном бумаги (толщиной 0,05 мм) или со стеклотканью (стеклосеткой). В качестве клеящего лака применяют шеллачный, глифталевый, полиэфирный или кремнийорганический.

Микафолый содержит 45...60% слюды, 17...32% клеящих веществ, остальное — бумага и летучие вещества. Маркировка микафолия аналогична принятой для миканитов, но на первом месте ставится буква М.

Микалента — склеенные пластинки слюды, с двух сторон обклеенные тонкой бумагой.

При разработке природной слюды и изготовлении электроизоляционных материалов на основе щипаной слюды образуется большое количество отходов. В результате утилизации этих отходов получают *слюдинитовые материалы (слюдиниты)*.

Слюдаинитовые материалы получают из слюдаинитовой бумаги, предварительно обработанной каким-либо клеящим составом (смолы, лаки). Номенклатура слюдаинитовых электроизоляционных материалов примерно та же, что и материалов на основе щипаной слюды: коллекторный, формовочный и гибкий слюдаиниты, слюдаинитофолы, слюдаинитовая лента и др.

4.3.4. Керамические материалы

4.3.4.1. Общие сведения

Керамика — неорганические поликристаллические материалы, получаемые из сформованных минеральных масс (глины и их смеси с минеральными добавками) в процессе высокотемпературного (1200...2500°C) спекания.

В керамической технологии используют главным образом каолины и глины, а также и другие виды минерального сырья, например чистые оксиды. Под каолинами и глинами понимают природные водные алюмосиликаты с различными примесями, способные при замешивании с водой образовывать пластичное тесто, которое после обжига необратимо переходит в камневидное состояние.

Керамические изделия изготовляют способами пластического формования и полусухого прессования с последующей сушкой и спеканием.

При нагреве глины во время спекания в ней начинают последовательно происходить химические и физико-химические процессы, приводящие к полному и необратимому изменению ее структуры:

- 1) удаление химически связанной воды (500...600°C);
- 2) разложение обезвоженной глины на оксиды (800...900°C);
- 3) образование новых водостойких и тугоплавких минералов (1000...1200°C);
- 4) образование некоторого количества расплава из легкоплавких компонентов глины (900...1200°C);
- 5) образование прочного камневидного материала за счет связывания твердых частиц образовавшимся расплавом.

При спекании происходят такие процессы, как дегидратация компонентов, деструкция органических технологических примесей (полимеры, поверхностно-активные вещества), диссоциация нестойких неорганических соединений, процессы окисления и восстановления, плавление некоторых компонентов, полиморфные превращения и т.д. В итоге после охлаждения стекловидный, может быть, частично закристаллизованный расплав связывает зерна более тугоплавкого компонента, образуя прочный монолит.

Состав керамики образован многокомпонентной системой, включающей:

- *кристаллическую фазу* (более 50%) — химические соединения и (или) твердые растворы;
- *стекловидную (или аморфную) фазу* (1...40%) — прослойки стекла, химический состав которого отличается от химического состава кристаллической фазы;
- *газовую фазу* — газы, находящиеся в порах.

Кристаллическая фаза является основой керамики и определяет значения механической прочности, термостойкости и других основных свойств. Стекловидная фаза ухудшает механическую прочность и тепловые показатели, однако стеклообразующие компоненты (глинистые вещества) облегчают технологию изготовления изделий.

По структуре порового пространства различают керамику с открытыми, т.е. сообщающимися с внешней средой, и закрытыми порами. Наличие даже закрытых пор ведет к снижению механической и электрической прочности, росту электрических потерь.

Керамика — изотропный материал, так как представляет собой поликристаллическое вещество с мелкими беспорядочно расположенными кристаллами. Керамику с анизотропией свойств получают на основе монокристаллов. Сегнето- и пьезокерамику получают при сохранении остаточной поляризации.

Свойства керамики определяются ее составом, структурой и пористостью. К основным свойствам керамических материалов относятся:

- плотность — 1800...3900 кг/м³ и более;
- водопоглощение — для пористой керамики 6...20% по массе (12...40% по объему), а для плотной — 1...5% по массе (2...10% по объему);
- теплопроводность в зависимости от пористости и химического состава — 0,8...1,16 Вт/(м·К). Сравнительно высокая теплопроводность у керамики на основе Al₂O₃ и особенно на основе BeO;
- $\sigma_{\text{раст}} = 30...300$ МПа, $\sigma_{\text{сж}} = 3000$ МПа и более;
- твердость, близкая к твердости алмаза;
- хрупкость;
- высокое электрическое сопротивление, отличные диэлектрические свойства;
- дугостойкость;
- водо-, химическая, коррозионная и жаростойкость.

Недостатком керамики является высокая усадка при спекании — 20...25% и выше, что создает трудности с обеспечением точных размеров изделия. Обработка готовых изделий затруднена, так как спеченная керамика обладает высокой твердостью, режется с трудом и только абразивами.

Способами воздействия на свойства керамических изделий являются химико-термическая обработка и использование покрытий, в том числе глазури.

Глазурь — защитно-декоративное стекловидное покрытие на керамике, закрепленное обжигом.

Прочность керамики с таким покрытием повышается на 15...20%, что связано со сжимающими напряжениями в поверхностном слое, которые возникают из-за разницы температурных коэффициентов линейного расширения керамики и глазури. Однако глазурь увеличивает электрические потери, поэтому ее не применяют в высокочастотной электрической керамике.

Изделия из керамики соединяют друг с другом и другими материалами с помощью стеклокристаллического цемента с последующей термической обработкой при 400...600°C, клеев и замазок на основе эпоксидной смолы и жидкого стекла, а также металлизацией с последующей пайкой.

Керамику классифицируют по вещественному составу, составу кристаллической фазы, структуре и назначению.

По вещественному составу разновидностями керамики являются фаянс, полуфарфор, фарфор, терракота, керметы, корундовая и сверхтвердая керамика и так называемая каменная масса.

Фаянс, полуфарфор и фарфор получают на основе жгущихся белых глин, каолинов, кварца и полевого шпата, взятых в различных соотношениях. Они обладают различной пористостью, что определяет механические свойства и водопоглощение. Водопоглощение фаянса 10...12%, предел прочности при сжатии обычно до 100 МПа. Полуфарфор по сравнению с фаянсом имеет более спекшийся черепок (водопоглощение 3...5%), и его прочность выше ($\sigma_{сж} = 150...200$ МПа). Фарфор отличается еще большей плотностью (водопоглощение 0,2...0,5%) и прочностью ($\sigma_{сж}$ — до 500 МПа), что позволяет изготавливать из него тонкостенные изделия.

Терракота — керамические изделия (облицовочные плиты, архитектурные детали, посуда и т.д.) с пористым черепком, обычно красного, коричневого или кремового цветов.

Керметы (керамико-металлические материалы) — искусственные материалы, получаемые спеканием металлических и керамических порошков, сочетающие свойства металлов и керамических веществ. Изделия из кермета — детали турбин и авиационных двигателей, режущий инструмент и др.

Корундовая керамика (минералокерамика) — это керамика на основе спеченного оксида алюминия, содержащего не более 2% примесей.

Сверхтвердая керамика — композиционный материал, получаемый на основе нитрида бора.

По составу кристаллической фазы различают керамику из чистых оксидов (Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , BeO , CaO и др.) и бескислородную (SiC , TiB_2 , ZrB_2 , BN , Si_3N_4 , $MoSi_2$).

По структуре (характеру строения черепка) керамика делится на *плотную* ($p = 1...2\%$) и *пористую* ($p = 15...20\%$). Пористые керамики поглощают более 5% воды (по массе), а плотные — 1...4% по массе или 2...8% по объему. Пористую структуру имеют кирпич, блоки, черепица, дренажные трубы и др.; плотную — плитки для полов, канализационные трубы, санитарно-технические изделия.

К числу новых по структуре керамических материалов следует отнести *волокнуистые керамические материалы*, получаемые спеканием, например, аморфного кварцевого волокна. Керамику с плотной структурой используют в качестве вакуумной, пористую и волокнуистую — как термоизоляционный материал и материал для высокотемпературных жидкостных и газовых фильтров.

По назначению керамику делят на *конструкционную, инструментальную, техническую и бытовую*.

4.3.4.2. Конструкционная керамика

Конструкционная керамика производится как *строительная и машиностроительная*.

В строительстве конструкционную керамику используют как долговечный материал, стойкий против износа, нагрева и агрессивных сред. По назначению строительные керамические материалы и изделия делят на виды, представленные в табл. 11.

Таблица 11

Виды строительных керамических материалов и изделий по назначению

Изделия	Дополнительные сведения
Кирпич обыкновенный, кирпич и камни пустотелые и пористые, крупные блоки и панели из кирпича и камней. <i>Керамические кирпичи</i> выпускаются сплошными и модульными, имеющими круглые или щелевые пустоты	<i>Стеновые</i> Основные свойства керамических кирпичей: • плотность сплошного кирпича — 1600...1900 кг/м³; • теплопроводность сплошного кирпича — 0,7...0,82 Вт/(м · °С); • по плотности и теплотехническим свойствам керамические кирпичи делят на три группы: <i>эффективные</i> — с высокими теплотехническими свойствами плотностью не более 1400...1450 кг/м³; <i>условно-эффективные</i> — плотностью 1450...1600 кг/м³; <i>обыкновенный кирпич</i> — плотностью свыше 1600 кг/м³; • водопоглощение кирпича марки выше 150 должно быть не менее 6%, а других марок — не менее 8% (это требует определенной пористости кирпича, иначе он станет слишком теплопроводным и будет плохо сцепляться со строительным раствором);

Изделия	Дополнительные сведения
	• предел прочности на сжатие определяет марку — 250, 300; • морозостойкость кирпича должна быть не менее 15 циклов попеременного замораживания и оттаивания (предусмотрены и более высокие марки по морозостойкости — F 25, 35 и 50). Кирпич не должен иметь механических повреждений и сквозных трещин. На одном кирпиче допускается не свыше двух <i>отбитостей ребер и углов</i> размером по длине ребра не более 15 мм. На отдельных кирпичах может быть допущена одна сквозная трещина протяженностью не более 30 мм по ширине кирпича. Кирпич должен быть нормально обожжен, и после обжига его цвет должен соответствовать цвету эталона нормально обожженного кирпича. Не допускаются известковые включения (<i>дутики</i>), вызывающие разрушение кирпича. Сплошной керамический кирпич должен иметь форму прямоугольного параллелепипеда с прямыми ребрами, четкими гранями и ровными лицевыми поверхностями; искривление ребер и граней кирпича не должно превышать 3 мм. Масса одного керамического кирпича должна быть не более 4 кг. Керамический кирпич применяют преимущественно для кладки стен зданий, изготовления сборных стеновых панелей, кладки печей и дымовых труб.
Пустотелые камни, балки и панели из пустотелых камней	<i>Элементы перекрытий</i> <i>Пустотелые элементы перекрытий</i> включают: • камни для армокерамических балок плотностью не более 1300 кг/м³; • камни для часторебристых перекрытий плотностью не более 1000 кг/м³; • камни для накатов плотностью до 1000 кг/м³.
Кирпич и камни керамические лицевые, ковровая керамика, плитки керамические фасадные	<i>Для наружной облицовки</i> <i>Фасадные керамические изделия</i> применяют для облицовки фасадных поверхностей стеновых панелей, блоков, цоколей зданий, лоджий, для отделки архитектурных элементов фасада зданий — поясов, карнизов — и создания декоративных панно. Для отделки сборных конструкций на заводах используют <i>коврово-мозаичные плитки</i> размерами 48×48 и 22×22 мм толщиной 2...4 мм, <i>плитки типа «кабанчик»</i> размером 120×65×7 мм, <i>типа брекчи</i> — ковры, набранные из плиточного боя. Для облицовки готовых кирпичных и бетонных стен применяют глазурованные и неглазурованные крупноразмерные (250×140×10 мм) и цокольные (150×75×7 мм) плиты. Эти плиты должны иметь спекшийся черепок и водопоглощение не более 5%.

Изделия	Дополнительные сведения
	Лицевые кирпичи и керамические камни применяют для кладки и одновременной облицовки наружных и внутренних стен зданий, возводимых из штучных изделий (кирпича, камня). Подобрав состав керамической массы и регулируя режим отжига, можно получить кирпич белого, кремового, коричневого цветов. Выпускают <i>лицевые кирпичи и керамические камни</i> с гладкой, а также рельефной или офактуренной лицевой поверхностью. На лицевой грани не допускаются трещины и отколы. Керамические облицовки относятся к числу наиболее экономичных наружных облицовок.
Плиты и плитки для стен и полов	<i>Для внутренней облицовки</i> Керамические плитки для внутренней облицовки стен изготавливаются с пористой структурой, лицевая поверхность их покрывается глазурью, которая придает плиткам водонепроницаемость и стойкость против воздействия слабых растворов кислот и щелочей. Для внутренней облицовки стен выпускают разнообразные по форме плитки: квадратные (150×150 мм), прямоугольные с прямыми кромками (150×100 и 150×75 мм). Плитки изготавливаются плоскими, рельефными, орнаментированными, с цветными рисунками. Керамические плитки для полов изготавливают из тугоплавких и огнеупорных каолиновых глин с различными добавками и, если требуется, окрашивающих примесей. Полы из керамических плиток практически водонепроницаемы, характеризуются малой истираемостью, не дают пыли, легко моются, стойки к действию кислот и щелочей. Недостатком плиток является большая теплопроводность (полы холодные), не позволяющая применять их в жилых помещениях. Плитки изготавливают квадратные, прямоугольные, шестигранные, восьмигранные, треугольные; длина граней 50...150 мм и толщина 10...13 мм. Для снижения трудоемкости устройства чистого пола изготавливают мозаичные плитки квадратной или прямоугольной формы размером 23 и 48 мм при толщине 6...8 мм. Мозаичные плитки на заводе наклеивают лицевой стороной на крафт-бумагу по определенному рисунку, получая ковры размером 398×598 мм. Керамические глазурованные плитки применяют для облицовки стен кухонь и санитарных узлов жилых зданий, школ, детских садов, больниц и поликлиник, торговых предприятий, помещений с повышенной влажностью (бань, прачечных), а также для облицовки внутренних стен лабораторных помещений. Цветные и многоцветные глазурованные плитки используют для облицовки станций метрополитена.

Изделия	Дополнительные сведения
	<i>Санитарно-технические</i> <i>Керамические санитарно-технические изделия</i> изготовляют из фаянса, полуфарфора и фарфора. Из фаянса преимущественно методом литья производят унитазы, умывальники, смывные бачки, ванны и др. Полуфарфор и фарфор применяются для производства более тонкостенных изделий. Поверхность санитарно-технических изделий обязательно покрывается глазурью, что придает им водонепроницаемость. Изделия санитарно-технической керамики белые, иногда светло-желтые, должны иметь правильную форму, ровную, гладкую и чистую поверхность без искривлений, равномерно покрытую глазурью; они должны быть хорошо обожжены.
Керамическая черепица	<i>Кровельные (черепица) плитки</i> Керамическая черепица должна выдерживать не менее 25 циклов попеременного замораживания и оттаивания в насыщенном водой состоянии. Выпускается <i>пазовая ленточная, пазовая штампованная, плоская ленточная, волнистая ленточная, s-образная ленточная и коньковая.</i>
Дренажные и канализационные трубы	<i>Для подземных коммуникаций</i> <i>Дренажные трубы</i> производят из кирпичных высокопластичных глин. Для этих труб водопоглощение черепка допускается не более 15%, морозостойкость — не ниже 15 циклов. Промышленность выпускает <i>гладкие неглазурованные трубы без раструбов или глазурованные с раструбом и перфорацией на стенках.</i> Применяют трубы при мелиоративных работах, а также при осушении. <i>Канализационные трубы</i> изготовляют из пластичных огнеупорных или тугоплавких глин. Они должны выдерживать гидростатическое давление не менее 0,2 МПа. Водопоглощение черепка труб: не более 9% для I сорта и 11% для II сорта. Поверхность труб снаружи и внутри покрывают кислотостойкой глазурью. Длина канализационных труб 800...1200 мм, внутренний диаметр 150...600 мм. Эти трубы на одном конце имеют раструб. Канализационные трубы применяют для отвода сточных и щелочных вод.
Теплоизоляционные, огнеупорные, кислотоупорные и другие изделия	<i>Плитки специального назначения</i> Для высокотемпературной теплоизоляции различных промышленных печей и тепловых агрегатов используют волокнистые керамические материалы — <i>алюмосиликатные волокна</i>, обладающие высокой прочностью, термической стойкостью и малой теплопроводностью.

Изделия	Дополнительные сведения
	Волокнистые керамические материалы способны по сравнению с кремнеземными (близкими по свойствам) материалами длительно выдерживать температуры 1650...1700°C, не боятся примесей и обладают в 2...2,5 раза более высокой прочностью. Основными недостатками, сдерживающими применение волокнистых материалов, являются низкие прочность и коррозионная стойкость и заметное пылевыведение, что требует использования специальных объемных и поверхностных покрытий (высокотемпературные коррозионно-стойкие терморегулирующие покрытия). Керамические огнеупорные изделия получают отливкой из расплава или обжигом минеральной смеси. Большинство керамических огнеупорных изделий (<i>огнеупоров</i>) — это керамика на основе SiO_2, Al_2O_3, MgO, ZrO_2, BeO, ThO_2, а также на основе SiC, Si_3N_4 и других бескислородных соединений. Возможные температуры эксплуатации оксидов, карбидов, боридов и нитридов 1600...2500°C, жаропрочных сталей и сплавов — 800...1200°C, молибдена — 1500°C, вольфрама — 1800°C. Наибольшее распространение в строительстве и промышленности строительных материалов получили кремнеземистые и алюмосиликатные огнеупорные изделия. Керамические огнеупорные изделия классифицируют по <i>огнеупорности, пористости, химикоминеральному составу и способу изготовления</i>. По огнеупорности керамические огнеупорные изделия могут быть <i>огнеупорными</i> (1580...1770°C), <i>высокоогнеупорными</i> (1700...2000°C) и <i>высшей огнеупорности</i> (более 2000°C). В зависимости от пористости керамические огнеупорные изделия подразделяются на <i>особо плотные огнеупоры</i> — пористость менее 3%, <i>высокоплотные огнеупоры</i> — пористость 3...10%, <i>плотные огнеупоры</i> — пористость 0...20%, <i>обычные огнеупоры</i> — пористость 20...30%, <i>легковесные огнеупоры (теплоизоляционные)</i> — пористость 45...85%. Керамические огнеупорные изделия применяют для строительства промышленных печей, топок и аппаратов, работающих при высокой температуре. К химически стойкой керамике относится глиношамотная керамика с грубозернистой структурой, а также фарфор. Керамические кислотоупорные изделия должны обладать <i>кислотостойкостью</i>, которая характеризует их нерастворимость в кислотах (за исключением плавиковой кислоты) и щелочах. Такие изделия изготавливают из глин, не содержащих примесей, понижающих химическую стойкость (карбонаты, гипс, серный колчедан и т.п.).

Изделия	Дополнительные сведения
	К керамическим кислотоупорным изделиям относят: • <i>кислотоупорный кирпич</i> марок 150...250 кислотостойкостью не менее 92...96%, водопоглощением не более 8...12%, термостойкостью не менее двух теплосмен; • <i>плитки кислотоупорные и термокислотоупорные</i> марки 300 кислотостойкостью 96...98%, водопоглощением не более 6...9%, термостойкостью не менее 2...8 теплосмен; • <i>трубы и фасонные части к ним</i> марок 300...400 кислотостойкостью не ниже 97...98%, водопоглощением не более 3...5%. Кислотоупорный кирпич и плитки служат для футеровки башен и резервуаров на химических предприятиях, а также печей для обжига серного колчедана, для устройства полов в цехах с агрессивными средами и т.п. Керамические кислотоупорные трубы применяют для перекачки неорганических и органических кислот и газов при разрежении или давлении до 0,3 МПа.
Дорожный (клинкерный) кирпич	<i>Дорожный кирпич</i> Вырабатывают из тугоплавких глин, обжигая их до спекания. Дорожный кирпич имеет марки 400, 600 и 1000. Его водопоглощение должно быть 2...6%, морозостойкость — 50...100 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Дорожный кирпич можно применять для мощения дорог и тротуаров, устройства полов промышленных зданий, кладки канализационных коллекторов.
Керамзит	<i>Заполнители для легких бетонов</i> Искусственный пористый заполнитель типа гравия для легких бетонов. Размер зерен 5...40 мм. Получают обжигом легкоплавких вспучивающихся глин.

Из машиностроительной керамики изготавливают поршни и головки блоков цилиндров (Si_3N_4), свечи зажигания (Al_2O_3), лопасти газовых турбин (MoSi_2), вакуумстойкий смазочный материал (MoS_2) и др.

4.3.4.3. Инструментальная керамика

Как инструментальный материал используется *корундовая и сверхтвердая керамика*.

Корунд известен в технике природными и синтетическими разновидностями. Природные разновидности корунда — рубин, сапфир, топаз, аквамарин, синтетические — корундовая керамика, среди изделий которой — микролит и электрокорунд.

Наиболее распространенное корундовое изделие — **микролит** (марка ЦМ-332) — получают спеканием при 1710...1750°C смеси тонкомолотого технического глинозема и оксида магния. Микролит по свойствам превосходит другие инструментальные материалы: плотность — до 3960 кг/м³; $\sigma_{сж} = 5000$ МПа, твердость — 92...93 HRA. Он обладает значительно большей красностойкостью (до 1200°C), твердостью и режущей способностью, чем быстрорежущие стали и твердые сплавы.

Резцы с пластинками из микролита используют для обработки сталей, чугунов, цветных металлов, неметаллов (графита, дерева, пластмасс и др.). Из микролита изготавливают также фильеры, сопла песко- и дробеструйных аппаратов, волокна и другие детали, работающие на истирание при наиболее высоких температурах. Недостатки микролита — высокая хрупкость и затрудненность крепления пластинок к державкам.

Электрокорунд (корракс) — корундовая керамика из спеченного оксида алюминия с добавками Cr^{3+} , Fe^{3+} , получаемая плавкой в электрических печах глиноземсодержащего сырья, имеющего не более 2% примесей.

Электрокорунд по твердости уступает лишь алмазу и имеет температуры плавления 1750...2050°C. Электрокорунд широко используют в светотехнике (вместо нитей накаливания), в приборостроении (часовые камни и др.), в лазерах как излучающий элемент, в теплотехнике как огнеупорный материал и для изготовления литейных форм и стержней.

Сверхтвердые керамические материалы — композиционные керамические материалы, получаемые введением различных легирующих добавок и наполнителей в исходный **нитрид бора**. Структура таких материалов образована прочно связанными мельчайшими кристаллитами, следовательно, они являются синтетическими поликристаллическими материалами.

Нитрид бора (**боразан**), имеющий алмазоподобное строение, является заменителем алмаза, стоек к окислению до 2000°C (алмаз начинает окисляться при 800°C).

К группе сверхтвердых керамических материалов относятся *композит 01 (эльбор-Р)*, *композит 02 (белбор)*, *композит 10 (гексанит-Р)*, а также *поликристаллический нитрид бора*.

Сверхтвердые керамические материалы используются для изготовления режущих пластин к инструментам для чистовой обработки труднообрабатываемых материалов и закаленной стали (более 55 HRC).

4.3.4.4. Техническая керамика

К технической керамике относятся *электро- и радиотехническая керамика, герметы, абразивные керамические материалы, пенокерамика* и др.

По электрическим свойствам керамику подразделяют на *собственно электротехническую*, применяемую при частотах до 20 тыс. Гц, и *радиотехническую*, используемую преимущественно при высоких (более 20 тыс. Гц) частотах.

Электротехническая керамика по области применения делится на *изоляционную* (установочную), *конденсаторную* (сегнетоэлектрики) и *пьезо-керамику*.

Изоляторная керамика должна иметь низкие потери, хорошие электроизоляционные свойства и прочность. Ведущую роль играет электрофарфор, в котором основные виды кристаллов представляют муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ и SiO_2 . Изоляторная керамика применяется для изготовления изоляторов, коллодок, плат, каркасов катушек и др.

Конденсаторная керамика должна иметь большую диэлектрическую проницаемость, малые потери и температурный коэффициент. Основу конденсаторной низкочастотной сегнетокерамики составляют твердые растворы титанатов бария (BaTiO_3 с добавками Zr — CM1), кальция (CaTiO_3) и стронция (SrTiO_3 — T-7500), а также станнат стронция (SrSnO_3 — BK-1) для варикондов. Высокочастотная конденсаторная керамика изготавливается на основе рутила TiO_2 (тиконд T-80), титанатов кальция (CaTiO_3 — тиконд T-150), циркония (ZrTiO_3 — термоконд T-20) и станнатов (станнатная керамика) кальция CaSnO_3 и магния MgSnO_3 и др. Использование конденсаторной керамики увеличивает надежность работы и теплостойкость конденсаторов и уменьшает их размеры.

Пьезокерамика — керамические материалы с пьезоэлектрическими свойствами. Структура пьезокерамики — твердые растворы на основе титанита бария (ТБС и ТБКС), ниобата бария (НБС) и ниобата и титаната свинца (НТС). Для НТС продольный пьезомодуль d_{33} до $7 \cdot 10^{-10}$ К/Н, $\epsilon = 400 \dots 1700$, максимальная температура эксплуатации 250°C .

Пьезокерамику применяют для устройств генерации и приема ультразвука; датчиков давления, ускорения, вибрации, в системах зажигания двигателей, в трансформаторах и др.

В качестве радиотехнической высокочастотной керамики используется радиофарфор (муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), корундомуллитовая керамика КМ-1 (муллит и корунд Al_2O_3), ультрафарфор ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ и Al_2O_3), алюминоксид Al_2O_3 , стеатит $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, цельзиан $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, поликор и микропит.

Миниатюризация электронной, вычислительной и СВЧ аппаратуры потребовала создания материалов с тангенсом угла диэлектрических потерь $0,0001 \dots 0,0002$, в частности нитридов бора и кремния и композиций на их основе. Причем имеется много возможностей варьирования их свойств путем изменения химического состава и структуры, а также технологий получения изделий.

Абразивные керамические материалы (*абразивы*) — вещества повышенной твердости, применяемые в массивном или измельченном состоянии для механической обработки (шлифования, резания, истира-

ния, заточки, полирования и т.д.) других материалов. Естественные абразивные материалы — *кремень, наждак, пемза, корунд, гранат, алмаз* и др.; искусственные абразивные материалы — *электрокорунд, карбид кремния, боразон, эльбор, синтетический алмаз* и др. По убыванию абразивной способности эти материалы располагаются так: синтетический алмаз, кубический нитрид бора, карбид бора, карбид кремния, карбид титана и электрокорунд. В настоящее время разрабатываются новые абразивные материалы на основе боридов и карбидов переходных металлов, а также типа *белбора*.

Основные характеристики абразивных материалов: твердость, прочность и износ, размер и форма абразивного зерна, абразивная способность, зернистость. С увеличением прочности этих материалов улучшается сопротивляемость усилиям резания, так как сопротивление сжатию у них в несколько раз больше, чем сопротивление растяжению. Прочность абразивных материалов на растяжение и сжатие снижается с повышением температуры шлифования.

Измельченный и классифицированный абразивный материал называют *шлифовальным*. Зернистость шлифовальных материалов определяется размером абразивных зерен, т.е. группой материалов по ГОСТ 3647—80: шлифзерно, шлифпорошки, микрошлифпорошки и тонкие микрошлифпорошки. Обозначение зернистости дополняют индексами В, П, Н и Д, которые характеризуют процентное содержание (массовую долю) основной фракции (36...60%).

Абразивные керамические материалы используются как в несвязанном виде (порошки, пасты, суспензии), так и в связанном (бруски, шлифовальные шкурки, круги, головки и др.).

4.3.5. Неорганическое стекло

4.3.5.1. Общие сведения

Неорганическое стекло — аморфный полимерный материал, получаемый при твердении расплава оксидов Si, Al, B, P, As, Pb и других элементов. Оно не имеет определенной точки плавления или затвердевания и при охлаждении переходит из расплавленного, жидкого состояния в высоковязкое состояние, а затем в твердое, сохраняя при этом неупорядоченность и неоднородность внутреннего строения.

В состав неорганического стекла входят *стеклообразующие оксиды*; *модифицирующие оксиды* (щелочные и щелочноземельные) вида Me_2O и MeO , изменяющие физико-химические свойства стекол; *технологические добавки* (оксиды алюминия, железа, свинца, титана, бериллия и др.), замещающие стеклообразующие оксиды и придающие стеклу необходимые потребительские свойства.

Модифицирующие оксиды вводят в процессе варки стекол. Глинозем Al_2O_3 повышает механическую прочность, а также термическую и химическую стойкость стекол. При добавке B_2O_3 повышается скорость стекловарения, улучшается осветление и уменьшается склонность к кристаллизации. Оксид свинца PbO , вводимый главным образом при изготовлении оптического стекла и хрусталя, повышает показатель светопреломления. Оксид цинка ZnO понижает температурный коэффициент линейного расширения стекла, благодаря чему повышается его термическая стойкость.

Технологические добавки делят по их назначению на следующие группы: *осветлители* — вещества, способствующие удалению из стекломассы газовых пузырей (сульфат натрия, плавиковый шпат); *обесцвечиватели* — вещества, обесцвечивающие стекольную массу; *глушители* — вещества, делающие стекло непрозрачным.

Стеклообразующие оксиды (например, SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , P_2O_5) образуют пространственную сетку из однородных звеньев-полиэдров, а модифицирующие оксиды, располагаясь внутри ячеек сетки, ослабляют или разрывают связи в стеклообразующих оксидах и снижают прочность, термо- и химическую стойкость стекла, но позволяют регулировать температуру его размягчения и другие свойства.

Строение кварцевых стекол (рис. 79, а) представляется наиболее простым. Здесь пространственная сетка образована из соединенных вершинами тетраэдров SiO_4 . Связи между кремнием и кислородом прочные, поэтому стекло мало расширяется при нагреве, плавится при температуре выше 1700°C , после плавления вязко и плохо формуется. Ячейки между тетраэдрами довольно велики, они расширяются при нагреве, и стекло теряет вакуумную плотность: при температуре 150°C оно пропускает гелий, выше 300°C — водород, а выше 800°C — воздух. В силикатных стеклах катионы металлов модифицирующих оксидов и технологических добавок помещаются (рис. 79, б) между отрицательно заряженными тетраэдрами SiO_4 , не нарушая строения силикатного каркаса. При этом углы между связями $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$ меняются в более широких ($120...180^\circ\text{C}$) пределах, чем в кварцевом стекле.

Свойства неорганических стекол изотропны. К основным свойствам относятся:

- плотность — $2200...6500 \text{ кг/м}^3$ (для стекол с оксидами свинца или бария — до 8000 кг/м^3);
- температуры для промышленных стекол: стеклования — $425...600^\circ\text{C}$; размягчения — $600...800^\circ\text{C}$;
- коэффициент теплопроводности — $0,7...15 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;
- температурный коэффициент линейного расширения: для кварцевых стекол — $5,6 \cdot 10^{-7} ^\circ\text{C}^{-1}$; для строительных стекол — $9,0 \cdot 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$;

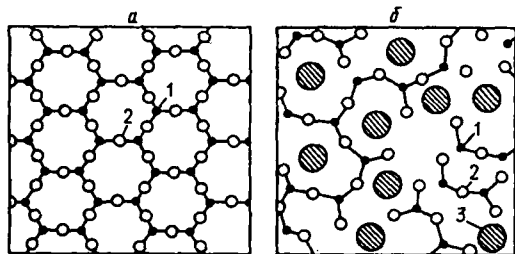


Рис. 79. Схема структуры стекол:
а — чистого кварцевого; б — натрийсиликатного (1 — Si; 2 — O; 3 — Na)

- $\sigma_{\text{сж}} = 500 \dots 2000 \text{ МПа};$
- $\sigma_{\text{раст}} = 30 \dots 90 \text{ МПа};$
- $\sigma_{\text{изг}} = 50 \dots 150 \text{ МПа};$

Более высокие прочностные характеристики имеют стекла бесщелочного состава и кварцевые:

- модуль Юнга — $(7 \dots 7,5) \cdot 10^4 \text{ МПа};$
- модуль сдвига — $(2 \dots 3) \cdot 10^4 \text{ МПа};$
- коэффициент Пуассона — $0,184 \dots 0,26;$
- твердость — $5 \dots 7 \text{ ед. по Моосу};$
- ударная вязкость — $1,5 \dots 2,5 \text{ кДж/м}^2;$
- удельное электросопротивление — $10^{12} \dots 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{см};$
- диэлектрическая проницаемость — $3,5 \dots 16;$
- полупроводниковые свойства;
- химическая стойкость;
- высокие оптические свойства.

По оптическим свойствам различают *прозрачное, окрашенное, бесцветное и рассеивающее свет стекла*.

К потребительским свойствам неорганических стекол относятся прозрачность, высокая стойкость к атмосферным воздействиям, водо- и воздухопроницаемость, термостойкость. Термостойкость стекла характеризует его долговечность в условиях резких изменений температуры и определяется разностью температур, которую стекло может выдержать без разрушения при резком охлаждении в воде ($t = 0^\circ\text{C}$). Для большинства видов стекол термостойкость колеблется от 90 до 170°C , а для кварцевого стекла она составляет $800 \dots 1000^\circ\text{C}$.

Стекло поддается механической обработке: его можно пилить циркулярными пилами с алмазной набивкой, обтачивать победитовыми резцами, резать алмазом, шлифовать, полировать.

Способы воздействия на свойства неорганических стекол определяются необходимостью нейтрализовать дефектный поверхностный слой. Их можно разделить на четыре группы: механическая обработка (*полирование*), химическая обработка (*травление*), термическая обработка (*закалка*), химико-термическая обработка. Так, закалка, при которой можно получить анизотропию свойств, и химико-термическая обработка стекла в несколько раз повышают показатели прочности и ударную вязкость, а также увеличивают термостойкость. Травление закаленного

неорганического стекла плавиковой кислотой способствует удалению поверхностных дефектов и также повышает прочность и термостойкость.

Неорганические стекла классифицируются по виду стеклообразующего вещества, виду модификаторов, технологии изготовления и назначению.

По виду стеклообразующего вещества неорганические стекла делятся на силикатные (SiO_2), алюмосиликатные ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$), боросиликатные ($\text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$), алюмоборосиликатные ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$), алюмофосфатные ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{P}_2\text{O}_5$), халькогенидные (например, $\text{As}_{31}\text{Ge}_{30}\text{Se}_{21}\text{Te}_{180}$), галогенидные и другие стекла.

По виду модификаторов различают щелочные, бесщелочные и кварцевые неорганические стекла. Прочность щелочных стекол под действием влаги уменьшается вдвое, так как вода выщелачивает стекло. При этом образуются щелочные растворы, которые расклинивают стекло, вызывая появление микротрещин в поверхностном слое.

По технологии изготовления неорганическое стекло может быть получено выдуванием, литьем, штамповкой, вытягиванием в листы, трубки, волокна и др. Стекло выпускается промышленностью в виде готовых изделий, заготовок и отдельных деталей.

4.3.5.2. Классификация стекол по назначению и области применения

По назначению неорганические стекла делятся на техническое, строительное и бытовое (стеклотара, посудное, бытовое и др.).

Техническое стекло по области применения делится на электротехническое, транспортное, оптическое, светотехническое, термостойкое, тугоплавкое, легкоплавкое, химико-лабораторное и др. Характерные свойства и дополнительные сведения о ряде таких стекол приведены в табл. 12.

Таблица 12

Основные данные технических стекол

Характерные свойства	Дополнительные сведения
Высокие значения удельного электро-сопротивления, большая электрическая прочность (16...50 кВ/мм), низкие значения диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta - 0,0018...0,0175$) и сравнительно высокая диэлектрическая проницаемость ($\epsilon - 3,5...16$), которая повышается при увеличении концентрации PbO или BaO . При нагреве в интервале температур 200...400°C	<i>Электротехническое</i> Как диэлектрик используют для колб осветительных ламп и радиоламп, в электровакуумных устройствах, для изоляторов, для герметизации интегральных схем. Так, в виде тонкой (до 3...4 мкм) пленки стекло используют в качестве прочной, нетрескающейся и терлостойкой изоляции на металлических проводах и термопарах. Халькогенидное стекло используется для

Характерные свойства	Дополнительные сведения
удельное электросопротивление уменьшается в 10^8–10^{10} раз, что связано с увеличением подвижности щелочных ионов, и стекло теряет свои изолирующие свойства. Оксиды тяжелых металлов — свинца и бария уменьшают подвижность ионов и снижают потери. При впаивании металла в стекло, при сваривании стекол разного состава в стекле появляются термические напряжения из-за различия температурных коэффициентов линейного расширения. Если температурные коэффициенты обоих материалов близки, то спаи стекла с материалом называются <i>согласованными спаями</i>, а если различны — <i>несогласованными спаями</i>.	герметизации полупроводниковых приборов. Электропроводящие (полупроводниковые) стекла: халькогенидные и оксидные ванадиевые — находят широкое применение в качестве термисторов, фотосопротивлений. Электротехнические стекла в зависимости от величины температурного коэффициента линейного расширения разделяются на платиновые (С89-2), молибденовые (С49-1) и вольфрамовые (С38-1). Каждая группа стекол используется для согласованных спаев с Мо, W и сплавами Fe–Ni. В марке электротехнического стекла указывается значение температурного коэффициента линейного расширения.
В машиностроении эффективно применяется как конструкционный материал при условии нейтрализации хрупкости, что достигается его закалкой, как правило, в воздушном потоке.	<i>Транспортное</i> Разновидностями транспортного стекла являются <i>триплексы</i> и <i>термопан</i>, применяемые для остекления в транспортных средствах, скафандрах. <i>Триплексы</i> — композиционный материал, получаемый из двух листов закаленного силикатного (или органического) стекла толщиной 2...3 мм, склеенных прозрачной эластичной полимерной (обычно из поливинилбутирала) пленкой. При разрушении триплекса образовавшиеся неострые осколки удерживаются на полимерной пленке. <i>Термопан</i> — трехслойное стекло, состоящее из двух листов закаленных стекол и воздушного промежутка между ними. Эта воздушная прослойка обеспечивает теплоизоляцию.
Специфическими свойствами стекол являются их оптические свойства: светопрозрачность, отражение, рассеяние, поглощение и преломление света. Коэффициент преломления таких стекол составляет 1,47...1,96, коэффициент рассеяния находится в интервале 20...71.	<i>Оптическое и светотехническое</i> Оптические стекла, применяемые в оптических приборах и инструментах, подразделяют на <i>кроны</i>, отличающиеся малым преломлением ($n_d = 1,50$), и <i>флинты</i> ($n_d = 1,67$) — с высоким содержанием оксида свинца.

Характерные свойства	Дополнительные сведения
Оптические свойства стекол зависят от их окраски, которая определяется химическим составом стекол, а также от состояния поверхности изделий. Оптические изделия должны иметь изотропную, свободную от напряжений структуру, которую получают отжигом, и гладкие полированные поверхности. Обычное неокрашенное листовое стекло пропускает до 90%, отражает примерно 8% и поглощает около 1% видимого и частично инфракрасного света; ультрафиолетовое излучение поглощается почти полностью. Кварцевое стекло является прозрачным для ультрафиолетового излучения. Светорассеивающие стекла содержат в своем составе фтор. Стекло с большим содержанием PbO поглощает рентгеновские лучи.	—
—	<i>Термостойкое и тугоплавкое</i> «Пирекс» — термостойкое стекло на основе SiO_2 (80,5%) с повышенным содержанием B_2O_3 (12%), Na_2O (4%), а также оксидами алюминия, калия и магния. «Мазда» — тугоплавкое стекло на основе SiO_2 (57,6%) с оксидами алюминия (25%), кальция (7,4%), магния (8%) и калия. «Пирекс» и «Мазда» используются для изготовления изделий, использующихся при повышенных температурах эксплуатации: оболочки термометров, смотровые стекла и др.
—	<i>Легкоплавкое</i> Эти стекла изготавливают на основе PbO (70%) с добавлением B_2O_3 (20%) или B_2O_3 (68,8%) с добавлением ZnO (28,6%) и Na_2O (2,6%); используются для изготовления эмалей, глазури и припоев для спаивания стекла

Строительное стекло выпускают следующих видов: *листовое*, *облицовочное* и *изделия и конструкции из стекла*.

Листовое стекло изготавливают из стеклянной массы, в состав которой входят 71...73% SiO_2 , 13,5...15% Na_2O , до 10% CaO , до 4% MgO и до 2% Al_2O_3 . Масса 1 м² листового стекла — 2...5 кг. Светопропускание — не менее 87%.

Листовое стекло вырабатывают трех сортов и в зависимости от толщины шести размеров (марок): 2; 2,5; 3; 4; 5 и 6 мм. Сорт листового стекла определяется наличием дефектов, к которым относятся: полосность — неровность на поверхности; *свилы* — узкие нитевидные полосы; пузыри — газовые включения и др. Ширина листов стекла 250...1600 мм, длина 250...2200 мм.

Промышленностью вырабатываются также специальные виды листового стекла: *витринное* (полированное), *теплопоглощающее*, *увиолевое* (пропускающее 25...75% ультрафиолетовых лучей), *закаленное*, *архитектурно-строительное* и др.

Листовое стекло — основной вид стекла, используемый для остекления оконных и дверных проемов, витрин, наружной и внутренней отделки зданий.

Облицовочное стекло применяют для отделки фасадов и внутренних помещений здания. К потребительским свойствам такого стекла относятся высокая декоративность (яркие цвета, блестящая поверхность), большая атмосферостойкость и долговечность. К группе облицовочных стекол относятся:

стемалит — листовый строительный материал из закаленного полированного (толщиной 6...12 мм) стекла, покрытого с внутренней стороны непрозрачной (глухой) керамической краской. Покрытие защищается со стороны помещения тонким слоем алюминия, нанесенным в вакууме. Применяется для внутренней и наружной облицовки зданий;

марблит — листовый строительный материал толщиной 12 мм из цветного глушеного стекла с полированной лицевой поверхностью и рифленой тыльной, может имитировать мрамор;

стеклянная эмалированная плитка — изготавливается из отходов листового стекла (стеклянная эмаль), наплавляемых на поверхность стекла, нарезанного на требуемые размеры (150×150, 150×70 мм при толщине 3...5 мм);

стеклянная мозаика — ковровая мозаика в виде мелких квадратных плиток (20×20 или 25×25 мм) из непрозрачного (глушеного) цветного стекла, выложенных в однотонные или мозаичные ковры;

смальта — кубики или пластинки толщиной 10 мм из цветной глушеной стекломассы, полученные отливкой или прессованием; применяется для изготовления мозаик.

Изделия и конструкции из стекла. К наиболее распространенным изделиям и конструкциям из стекла в строительной промышленности относятся:

стеклоблоки — полые блоки из двух отформованных половинок, сваренных между собой. Светопропускание — не менее 65%, светорассеяние — около 25% (светорассеяние повышают рифлением внутренней стороны блоков), теплопроводность — $0,4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Применяются для заполнения световых проемов в наружных стенах и устройства светопрозрачных покрытий и перегородок;

стеклопакеты — два-три листа стекла, соединенных по периметру металлической рамкой (обоймой), между которыми создана герметически замкнутая воздушная полость. Применяются для остекления зданий;

стеклопрофилит — крупногабаритные строительные панели из профильного стекла, изготавливаемые методом непрерывного проката коробчатого, таврового, швеллерного и полукруглого профилей. Стеклопрофилит может быть армированным и неармированным, бесцветным и цветным. Применяется для устройства светопрозрачных ограждений зданий и сооружений.

4.3.5.3. Материалы и изделия из стекла

Стекловолокно — волокнистый материал, получаемый из расплавленной стекломассы. Наиболее широко применяются бесщелочное алюмоборосиликатное Е-стекло, а также высокопрочное стекло на основе оксидов: SiO_2 , Al_2O_3 , MgO . Диаметр стекловолокна колеблется от 0,1 до 300 мкм. Форма сечения может быть в виде круга, квадрата, прямоугольника, треугольника, шестиугольника. Выпускаются и полые волокна. По длине волокно делится на штапельное (от 0,05 до 2...3 м) и непрерывное. Плотность стекловолокна — $2400...2600 \text{ кг/м}^3$. Прочность элементарных стеклянных волокон в несколько десятков раз выше объемных образцов стекла: прочность на растяжение достигает для непрерывных волокон диаметром 6...10 мкм — $1500...3000 \text{ МПа}$. Стекловолокно имеет высокие тепло-, электро- и звукоизоляционные свойства, оно термо- и химически стойко, негорюче, не гниет.

Поверхность стеклянных волокон при транспортировке и различных видах переработки замасливают для предотвращения истирания, так как от состояния поверхности волокон зависит их прочность. Из стекловолокна изготавливают *стекловату*, *ткани* и *сетки*, а также *нетканые материалы* в виде жгутов и холстов, стекломатов.

Стекловата — материал из стеклянных волокон, диаметр которых для изготовления теплоизоляционных изделий не должен превышать 21 мкм. Структура ваты должна быть рыхлой — количество прядей, состоящих из параллельно расположенных волокон, не более 20% по массе. Плотность в рыхлом состоянии не должна быть более 130 кг/м^3 . Теплопроводность — $0,05 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ при 25°C . Стеклянную вату из непрерывного волокна приме-

няют для изготовления теплоизоляционных материалов и изделий при температурах изолируемых поверхностей от -200 до $+450^{\circ}\text{C}$.

Стекловата из супертонкого волокна имеет плотность 25 кг/м^3 , теплопроводность $0,03 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, температурах эксплуатации — от -60 до $+450^{\circ}\text{C}$, звукопоглощение $0,65 \dots 0,95$ в диапазоне частот $400 \dots 2000 \text{ Гц}$. Стекловата из супертонкого волокна, а также изделия на ее основе используются в строительстве в качестве звукоизоляционного материала.

Стекломаты (АСИМ, АТИМС, АТМ-3) — материалы, состоящие из стекловолокон, расположенных между двумя слоями стеклоткани или стеклосетки, простеганной стеклонитками. Они применяются при температурах $60 \dots 600^{\circ}\text{C}$ в качестве армирующих элементов в композиционных материалах.

Стеклорубероид и стекловолок — рулонные материалы, получаемые путем двухстороннего нанесения битумного (битумно-резинового или битумно-полимерного) вяжущего вещества, соответственно, на стекловолоконный холст или стекловолок и покрытия с одной или двух сторон сплошным слоем посыпки. Сочетание биостойкой основы и пропитки с повышенными физико-механическими свойствами позволяет достичь долговечности для стеклорубероида около 30 лет.

В зависимости от вида посыпки, предотвращающей слипание при хранении в рулонах, и назначения стеклорубероид выпускают следующих марок: С-РК (с крупнозернистой посыпкой), С-РЧ (с чешуйчатой посыпкой) С-РМ (с пылевидной или мелкозернистой посыпкой). Применяют стеклорубероид для верхнего и нижнего слоев кровельного ковра и для оклеечной гидроизоляции.

Гидростеклоизол — гидроизоляционный рулонный материал, предназначенный для гидроизоляции железобетонных обделок туннелей (марка Т), пролетных строений мостов, путепроводов и других инженерных сооружений (марка М).

Гидростеклоизол состоит из стеклоосновы (*тканой или нетканой сетчатки, дублированной стеклохолстом*), покрытой с обеих сторон слоем битумной массы, в которую входят битум, минеральный наполнитель (около 20%) с молотым тальком, магнезитом, а также пластификатором. Отличается помимо высокой водонепроницаемости хорошими прочностными показателями при растяжении в продольном направлении. Он выдерживает разрывную нагрузку при высшей категории качества 735 Н. Теплостойкость — $60 \dots 65^{\circ}\text{C}$, температура хрупкости — от -20 до -10°C .

Гидростеклоизол наклеивают без применения мастик — равномерным плавлением (например, используя пламя газовой горелки) его поверхности.

Пеностекло (ячеистое стекло) — ячеистый материал, получаемый спеканием тонко измельченного стекольного порошка и порообразователя. Вырабатывают из стекольного боя либо используют те же сырьевые материалы, что и для производства других видов стекла: кварцевый песок,

известняк, соду и сульфат натрия. Порообразователями могут быть кокс и известняк, антрацит и мел, а также карбиды кальция и кремния, выделяющие при спекании углекислый газ, образующий поры.

Пеностекло имеет специфическое строение — в материале стенок крупных пор (0,25...0,5 мм) содержатся мельчайшие микропоры, что обуславливает малую теплопроводность (0,058...0,12 Вт/(м·К)) при достаточно большой прочности, водостойкости и морозостойкости. Пористость различных видов пеностекла составляет 80...95%; плотность — 150...250 кг/м³; прочность — 2...6 МПа. Обладает высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами. Пеностекло — негорючий материал с высокой (до 600°С) теплостойкостью. Легко обрабатывается (пилился, шлифуется); оно хорошо склеивается, например, с цементными материалами.

Плиты из пеностекла применяют для теплоизоляции ограждающих конструкций зданий (стен, перекрытий, кровель и др.), в конструкциях холодильников (изоляция поверхностей с температурой эксплуатации до 180°С), для декоративной отделки интерьеров. Из пеностекла с открытыми порами изготавливают фильтры для кислот и щелочей.

Стеклопор получают путем грануляции и вспучивания жидкого стекла с минеральными добавками (мелом, молотым песком, золой ТЭС и др.). Выпускается трех марок: СЛ — $\rho_0 = 15...40$ кг/м³, $\lambda = 0,028...0,035$ Вт/(м·К); Л — $\rho_0 = 40...80$ кг/м³, $\lambda = 0,032...0,04$ Вт/(м·К); Т — $\rho_0 = 80...120$ кг/м³, $\lambda = 0,038...0,05$ Вт/(м·К).

В сочетании с различными связующими веществами стеклопор используют для изготовления штучной, мастичной и заливочной теплоизоляции. Наиболее эффективно применение стеклопора в ненаполненных пенопластах, так как введение его в пенопласт позволяет снизить расход полимера и значительно повысить огнестойкость теплоизоляционных изделий.

Армированное стекло — конструкционное изделие, получаемое методом непрерывного проката неорганического стекла с одновременным закатыванием внутрь листа металлической сетки из отожженной хромированной или никелированной стальной проволоки. Это стекло имеет предел прочности при сжатии 600 МПа, повышенную огнестойкость (до 1,3 ч), безосколочно при разрушении, светопропускаемость — более 60%. Может иметь гладкую, кованую или узорчатую поверхность, быть бесцветным или цветным.

Армированное стекло применяют для остекления фонарей верхнего света, оконных переплетов, устройства перегородок, лестничных маршей и др.

4.3.6. Ситаллы

Ситаллы (стеклокристаллические материалы) — искусственный материал на основе неорганического стекла, получаемый путем полной или частично управляемой кристаллизации в них.

Термин «ситаллы» образован от слов: «стекло» и «кристаллы». По структуре и технологии получения ситаллы занимают промежуточное положение между обычным стеклом и керамикой. От неорганического стекла они отличаются кристаллическим строением, а от керамических материалов — более мелкозернистой и однородной микрокристаллической структурой.

В состав ситаллов входят:

- оксиды — Li_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , CaO и др.;
- нуклеаторы (катализаторы кристаллизации) — соли светочувствительных металлов — Au , Ag , Cu , являющиеся коллоидными красителями и присутствующие в стекле в виде тонкодисперсных частиц. Нуклеаторы являются дополнительными центрами кристаллизации (рис. 80). Они должны иметь кристаллическую решетку, подобную выделяющимся из стекла кристаллическим фазам, и способствовать равномерной кристаллизации всей массы;
- глушители (плохо растворимые частицы) — фтористые и фосфатные соединения, TiO_2 и др.

Структура ситаллов мелкокристаллическая, однородная, характеризуется отсутствием пористости. Средний размер кристаллитов в ситаллах 1...2 мкм. Содержание кристаллической фазы — не менее 40...50%. Кристаллиты срастаются между собой или связаны прослойками остаточного аморфного стекла. Количество стеклофазы не превышает нескольких процентов. Беспорядочная ориентация кристаллитов приводит к отсутствию в ситаллах анизотропии.

Регулируя режимы термообработки, можно изменять степень кристаллизации и размеры кристаллов, что отражается на свойствах изделия. Свойства ситаллов изотропны и в основном определяются фазовым составом и их структурой. Основными свойствами ситаллов являются:

- плотность — 2400...2950 кг/м³;
- температура размягчения — 1250...1350°C;
- низкая теплопроводность — 2...7 Вт/(м·К);
- температурный коэффициент линейного расширения — $(7...300) \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.
- $\sigma_{\text{сж}} = 700...2000 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{в}} = 112...160 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{изг}} = 70...350 \text{ МПа}$;
- модуль Юнга — 84...141 ГПа;
- хрупкость (при ударной вязкости 4,5...10,5 кДж/м²);

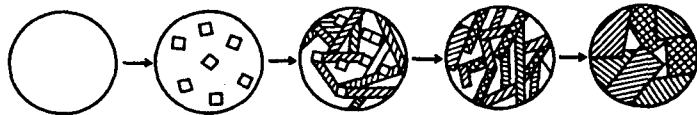


Рис. 80. Схема кристаллизации стекла при образовании ситаллов с помощью нуклеаторов

- микротвердость — 7000...10500 МПа;
- износостойкость ($f = 0,07...300$);
- термостойкость — 200...700°C (до 1100°C);
- диэлектрические свойства;
- химическая стойкость;
- газонепроницаемость и нулевое водопоглощение.

По внешнему виду ситаллы могут быть непрозрачными (глухими), прозрачными, а также окрашенными (темного, коричневого, серого, кремового и светлого цветов). Прочность их зависит от температуры: до 700...780°C она снижается незначительно, а при более высоких температурах быстро падает. Жаропрочность ситаллов составляет 800...1200°C.

Причина особо ценных свойств ситаллов заключается в их исключительной мелкозернистости и почти идеальной поликристаллической структуре. В них совершенно отсутствует всякая пористость. Усадка материала при его переработке незначительна. Большая абразивная стойкость делает их малочувствительными к поверхностным дефектам.

Детали из ситаллов соединяют друг с другом и другими материалами с помощью стеклокристаллического цемента с последующей термической обработкой при 400...600°C, клеев и замазок на основе эпоксидной смолы и жидкого стекла, металлизацией с последующей пайкой.

Ситаллы классифицируют в зависимости от способа производства, от характера исходных материалов и по назначению.

Ситалловые изделия получают, как правило, путем плавления стекольной шихты специального состава, охлаждения расплава до пластического состояния и последующего формования методами стекольной или керамической технологии (вытягивание, выдувание, прокатка, прессование), а затем ситаллизацией. Такие изделия получают также порошковым методом спекания.

По характеру исходных материалов и свойств выделяют: *петроситаллы*, *шлакоситаллы* и *технические ситаллы*. Разновидностью ситаллов являются *ситаллопласты* — композиционные материалы, получаемые на базе пластических масс (фторопластов) и ситаллов.

Петроситаллы получают на основе габбро-норитовых, диабазовых и других горных пород, шлакоситаллы — из металлургических или топлив-

ных шлаков. Технические ситаллы изготавливают на основе искусственных композиций из различных химических соединений — оксидов, солей.

По назначению ситаллы делятся на *конструкционные* (строительные и машиностроительные), *технические*, *радио-*, *электро-* и *фототехнические*. На основе ситаллов получают различные клеи для склеивания металла, стекла, керамики. Наиболее широкое распространение в строительстве получили *шлакоситаллы* и *пеношлакоситаллы*.

Шлакоситаллы — ситаллы из огненно-жидких металлургических шлаков. Плотность — $600...2700 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_{\text{сж}} = 250...550 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{изг}} = 65...130 \text{ МПа}$, $E = 11 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, рабочие температуры — до 750°C , водопоглощение практически равно нулю; высокие кислото- и щелочестойкость.

Изделия из шлакоситалла дешевы и отличаются высокой долговечностью. Эти изделия используются для лестничных ступеней, плиток полов, внутренних перегородок, как кровельный и стеновой материал, для облицовки ответственных частей гидросооружений, а также в дорожном строительстве в качестве плит для тротуаров, дорожных покрытий, бортовых камней. Листовой шлакоситалл (можно получать любого цвета) используется как декоративно-отделочный материал для наружной и внутренней облицовки сооружений. Шлакоситаллы могут быть получены любых цветов, а по долговечности они конкурируют с базальтами и гранитами.

Пеношлакоситалл — вспененный шлакоситалл с ячеистой структурой. Эффективный теплоизоляционный материал с незначительным водопоглощением и малой гигроскопичностью. Рабочие температуры — до 750°C . Пеношлакоситаллы используют для утепления стен и звукоизоляции помещений, а также для изоляции трубопроводов теплотрассы и промышленных печей.

В машиностроении ситаллы применяют для изготовления подшипников, деталей двигателей, труб, жаростойких покрытий, лопастей компрессоров, точных калибров металлорежущих станков, метрологических мер длины, фильер для вытягивания синтетического волокна, абразивов для шлифования; в химическом машиностроении — пар трения, плунжеров, деталей химических насосов, реакторов, мешалок, запорных клапанов. Радио- и электротехнические ситаллы используются для изготовления подложек, оболочек, плато, сетчатых экранов, антенных обтекателей и др., а также как жаростойкие покрытия для защиты металлов от действия высоких температур. Фототехнические ситаллы применяются для изготовления сетчатых экранов телевизоров, коллиматоров света, дорожных знаков, зеркал телескопов, для замены фотоэмульсий диапозитивов, на шкалах приборов и др. Разрешающая способность и качество изображения у фотоситаллов выше, чем у обычных фотоэмульсий.

ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

5.1. Общие сведения

Полимерные пластические материалы — искусственные материалы, получаемые на основе природных или синтетических высокомолекулярных полимеров при нагреве путем формования в размягченном состоянии под давлением и с последующим переходом в твердое состояние сформованной массы при дальнейшем ее нагревании (термореактивные) или охлаждении (термопластичные). В инженерной практике такие материалы называются *пластмассами*.

Пластмасса — материал, представляющий собой композицию полимера или олигомера с различными ингредиентами, находящуюся при формовании изделий в вязкотекучем или эластичном состоянии, а при эксплуатации — в стеклообразном или кристаллическом состоянии.

Широкое распространение пластмасс предопределили следующие их достоинства: неограниченные запасы сырья, легкость переработки в изделия с небольшими трудовыми затратами, малая себестоимость и комплекс ценных свойств, а именно:

- плотность: плотных пластмасс — от 900 (полипропилен) до 2200 (полимерный бетон) кг/м³, ячеистых с пористостью до 95% — 10...20 кг/м³;
- теплопроводность пластмасс при отсутствии наполнителей 0,116...0,348 Вт/(м · К), а у поропластов — 0,028...0,0348 Вт/(м · К);
- $\sigma_{сж} = 150$ (древесно-слоистые пластики)...350 (стеклопластики) МПа;
- конструктивная прочность $\sigma_{сж}/\rho = 1...2$ (для кирпича — 0,02, бетона — 0,06, древесины — 0,07);
- модуль Юнга $E = (0,1...0,31) \cdot 10^5$ МПа (для ненаполненных пластмасс — $0,001...0,045 \cdot 10^5$ МПа);
- водопоглощение: для плотных пластмасс — 0,1...0,5%, для пористых — 30...90%;
- хорошие фрикционные и антифрикционные свойства;
- низкая истираемость — 0,035...0,05 г/см² (истираемость наиболее твердых горных пород — 0,01...0,1 г/см²);

- диэлектрические свойства;
- высокие оптические свойства — бесцветность и прозрачность органических стекол;
- высокая химическая стойкость в ряде сред и неподверженность коррозии;
- хорошие декоративные свойства — окрашиваются в любые цвета и долго сохраняют цвет;
- долговечность.

Ценным свойством пластмасс является легкость их обработки, что позволяет придавать им разнообразную, даже самую сложную форму с помощью различных технологических приемов (литье, прессование, экструзия и др.), которые могут быть механизированы и автоматизированы. Большую группу пластмасс можно сваривать между собой и таким образом изготавливать сложной формы трубы и различные емкости.

Недостатками пластмасс являются следующие их свойства:

- низкая ударная вязкость;
- повышенная ползучесть;
- высокий температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$ (поливинилхлорид — 80...90, полиэтилен — 160...230). У сталей этот показатель равен 9...12, алюминия — 22...24, бетона — 12, стекла — 0,8...8;
- низкая теплостойкость (при средней теплостойкости, равной 80...150°C, до 400°C у кремнийорганических полимеров);
- способность воспламеняться или подвергаться деструкции под действием огня;
- накопление зарядов на поверхности изделий (нужны антистатиками);
- старение;
- токсичность;
- пожароопасность.

Общая классификация пластмасс может быть дана по следующим признакам: *по происхождению полимеров, составу и структуре, происхождению наполнителей и их виду, упругим свойствам при нормальной температуре, отношению к нагреву и области применения.*

По происхождению полимеры, используемые для изготовления пластмасс, делятся на *природные* и *синтетические*. Природные полимеры, в свою очередь, могут быть *органическими* и *неорганическими*.

По составу пластмассы могут быть *простыми ненаполненными* (чистый полимер) и *сложными наполненными*, в том числе *газонаполненными*.

По структуре пластмассы делят на *гомогенные* (однородные) и *гетерогенные* (неоднородные) *пластмассы*. Структура пластмасс в первую очередь определяется их составом.

Наполнители для пластмасс по происхождению могут быть *органическими* (хлопковые очесы, ткани, бумага и др.), *неорганическими* (слюда, кварц, стеклянное волокно, мука и др.) и *газовоздушными*. По виду наполнители делятся на *порошкообразные, волокнистые и листовые*.

По упругим свойствам при нормальной температуре различают *жесткие* ($E > 1$ ГПа), *полужесткие* ($E = 1...0,4$ ГПа), *мягкие* ($E = 0,02...0,1$ ГПа) и *эластичные* ($E < 0,02$ ГПа) *пластмассы*. Жесткие пластмассы имеют предел прочности на сжатие при 50%-ной деформации более 0,15 МПа, эластичные при аналогичных условиях — менее 0,01 МПа. Примерами жестких пластмасс являются фено- и аминопласты; полужестких — полиамиды и полипропилен; мягких — поливинилацетат и полиэтилен. К эластичным пластмассам относят разнообразные каучуки.

По отношению к нагреву пластмассы могут быть *термореактивными* (реактопласты) и *термопластичными* (термопласты).

К основным термопластичным полимерам относятся полиэтилен, полистирол, полиметилакрилат, поливинилхлорид (винипласт) и др. В этой группе полимеров усадка при формовании изделий достигает всего 1...3%, поэтому, как правило, их не сочетают с наполнителями. Недостатком этих пластмасс являются незначительная прочность и теплостойкость.

Среди термореактивных полимеров наибольшее распространение получили фенолоформальдегид, а также полиэфирные и полисиликоновые (кремнийорганические) полимеры. Термореактивные полимеры обладают повышенной теплостойкостью, однако для них характерны хрупкость и очень большая усадка при изготовлении изделий (10...15%).

По применению пластмассы можно подразделить на *конструкционные общего и специального* (фрикционные и антифрикционные, уплотнительные, тепло- и электроизоляционные, химически стойкие, декоративные и др.) *назначения и с особыми физико-химическими свойствами* (например, оптически прозрачные). Однако это деление условно, так как одна и та же пластмасса может обладать разными свойствами.

Общепринятой единой научной классификации пластмасс не существует, более того, один и тот же вид пластмассы может иметь различные фирменные названия, которые не дают никаких представлений о свойствах материала.

Пластмассы принято разделять на четыре класса в зависимости от происхождения и способа получения основных компонентов смол, входящих в их состав, с подразделением этих классов на группы по химической структуре смол-полимеров. Каждая группа разделяется в свою очередь на виды по химическим и техническим наименованиям пластмасс.

Класс А составляют пластмассы на основе высокомолекулярных соединений, полученных цепной полимеризацией. Эти пластмассы подразде-

ляются на девять групп: полимеры этилена, галоидопроизводных этилена, алкалпроизводных этилена и т.д. Указанные девять групп разделяются на 35 видов: этиленолоид, этиленолит, хлорвинилоид, хлорвинилит, изобутиленопласт и др.

Класс Б включает пластмассы на основе высокомолекулярных соединений, получаемых поликонденсацией. Пластмассы класса Б подразделяются на семь групп, включающих 32 вида, среди которых фенолит, фенодреволит, резиноасболит, аминоцеллолит, глифталъслюдослой и др.

Класс В составляют три группы пластмасс на основе природных химических модификационных полимеров (белковых веществ, простых и сложных эфиров целлюлозы). Эти группы разделяются на семь видов — метилцеллоупленка, этилцеллолит и др.

Класс Г составляют пластмассы на основе природных и искусственных асфальтов, а также смол, получаемых деструкцией различных органических веществ. Этот класс делится всего на три вида: битумоцеллолит, пекоасбослой и битуминолит.

Дополнительная классификация пластмасс построена по убывающему влиянию наполнителя:

класс I — с листовым наполнителем (текстолит, асботекстолит, гетинакс, древесно-слоистый пластик, стеклотекстолит, пропитанные ткани);

класс II — с волокнистым наполнителем при соответствующих основах (волокнит, пресс-крошка — текстиль, стеклоткань, древесный шпон; асбоволокнит — фенолоформальдегидные смолы; асбоволокниты мочевино-мелавино-формальдегидные смолы и др.);

класс III — с порошковым наполнителем (пресс-порошки общего назначения, пресс-порошки с высокими электроизоляционными свойствами и др.);

класс IV — без наполнителя (поливинилхлориды, поливинилацетаты, полистирол и сополимеры и др.);

класс V — с газовоздушным наполнителем (мипора, пенополивинилхлорид, пенополистирол, пенополиуретан, поролон и др.);

класс VI — наполнители любого типа на основе эпоксидных или полиэфирных смол;

класс VII — профильные пластмассы, а также стандартизированные изделия универсального назначения (трубы, арматура и соединительные части, оборудование и детали, пленка и др.).

Некоторые виды наиболее распространенных пластмасс представлены марками, получившими специальное назначение в тех или иных отраслях народного хозяйства. Так, например, в машиностроении по текстолиту (класс I, вид 1) приведены 12 различных марок, отличающихся свойствами и назначением, по стеклотекстолиту (класс I, вид 5) — 32 марки, по поли-

амидам (класс IV, вид 9) — 8 марок и т.д. Вместе с тем перечень марок пластмасс не исчерпывает всех известных стандартных, ведомственных и экспериментальных видов полимеров и пластмасс на их основе и ограничивается, как правило, только ассортиментом материалов, наиболее распространенных и перспективных для данной отрасли.

5.2. Состав пластических материалов

В состав сложных наполненных пластмасс входят *наполнители*, *пластификаторы* и *отвердители*, а также различного рода *добавки*. Вид каждого из компонентов, их сочетание и количественное соотношение определяют свойства пластмасс и позволяют изменять их характеристики в широких пределах. Для получения окрашенных пластмасс используют *пигменты*.

Органические и неорганические наполнители используются в составе пластмасс (40...70% по массе) для снижения их стоимости, а также улучшения ряда технологических и потребительских свойств — повышения сопротивляемости усадке, прочности и твердости, снижения ползучести и др. Органические наполнители повышают прочность, снижают хрупкость, но ухудшают термо- и водостойкость пластмасс. Минеральные наполнители повышают прочность, водостойкость, химическую стойкость, тепло- и электроизоляционные свойства пластмасс, но часто повышают их хрупкость и плотность.

Наполнители могут образовывать с полимером механическую смесь или вступать с ним в химическое взаимодействие (белые сажи, органо-кремнеземы). Активность наполнителя по отношению к полимерному связующему веществу определяется его адсорбционной способностью и степенью полярности. При наличии химического взаимодействия повышается термостойкость полимерного материала, а также его прочностные свойства.

Наполнители могут вводиться в состав полимерного материала и для придания ему необходимых физико-химических свойств, например: асбестовые наполнители — для повышения тепло-, водостойкости, химической стойкости и стойкости к высокочастотным воздействиям; наполнители на основе стекловолокна — для большей термостойкости, хорошей сопротивляемости тепловым ударам, улучшения электроизоляционных свойств.

Порошкообразные наполнители изготавливают на основе древесной муки, целлюлозы, слюды, талька, кварцевой муки, мела, графита, каолина и др. В качестве волокон используются хлопчатобумажные, асбестовые, стеклянные и полимерные волокна, а в качестве листов — бумага, ткани, древесный шпон, рогожки из стекловолокна и др.

От выбора вида наполнителя во многом зависят механические свойства полимерного материала. Так, порошкообразные наполнители повышают твердость и предел прочности при сжатии; наполнители волокнистой структуры увеличивают прочность на изгиб, особенно при динамическом действии нагрузки; еще значительно повышается прочность в случае использования листового наполнителя, поскольку такой материал может воспринимать и растягивающие напряжения. Полимерные материалы с листовым наполнителем применяют в виде листов, труб, плит, а также в крупногабаритных изделиях простого контура.

Пластификаторы применяют для улучшения формуемости и уменьшения хрупкости пластмасс. Пластификаторы облегчают скольжение макромолекул друг относительно друга и в результате повышают гибкость и эластичность полимеров, облегчают условия переработки пластмасс. В качестве пластификаторов широко используются органические вещества с высокой температурой кипения и низкой температурой заморозки (олеиновая кислота, стеарин и др.), а также природные смолы и битумы. Их количество может колебаться в широких пределах — от 5 до 40% по массе.

Отвердители (1...3%) вводят в термореактивные пластмассы для ускорения процесса их твердения и образования пространственно-сетчатых структур. Отвердителями являются сера, различные амины, органические перекиси и др.

Добавки-стабилизаторы играют особую роль в составе пластмасс. Их введение может обеспечить изменение каких-либо свойств: уменьшение горючести (*антипирены*), статических зарядов (*антистатики*), защиту от плесени (*антисептики*), термо- или светостабилизацию, ускорение (замедление) твердения и др. В необходимых случаях вводятся также вещества, связывающие выделяющиеся летучие продукты. Добавки-стабилизаторы способствуют длительному сохранению свойств изделий из пластмасс (препятствуют старению) в процессе их эксплуатации или хранения.

Смазывающие вещества вводят для уменьшения прилипаемости пластмассовых изделий к металлическим частям пресс-формы.

5.3. Характеристики некоторых пластмасс и изделий на их основе

5.3.1. Пластмассы с листовым наполнителем

Декоративные бумажно-слоистые пластики получают прессованием специальной бумаги, пропитанной термореактивными полимерами. Для внутренних слоев применяют крафт-бумагу, для верхних слоев — декоративную бумагу.

Плотность декоративных бумажно-слоистых пластиков (ДБСП) примерно 1400 кг/м^3 . Предел прочности при растяжении ДБСП составляет не менее 90 МПа вдоль листа и не менее 70 МПа поперек. Предел прочности при изгибе — 100 МПа (до 120 МПа). Водопоглощение — не более 8%. Бумажно-слоистые пластики выдерживают нагрев до 120°C . Пластикам, нагретым до $100\ldots 120^\circ\text{C}$, легко придается любая необходимая форма, которая сохраняется после охлаждения.

ДБСП выпускают трех марок: А — повышенной износостойкости для отделки горизонтальных поверхностей; Б — для отделки вертикальных поверхностей и менее жестких условий эксплуатации; В — для отделочных работ.

Поверхность ДБСП может имитировать ценные породы дерева или камня, быть глянцевой или матовой, одно- или многоцветной. Печатный рисунок защищает специальная покрывающая бумага «оверлей».

Фибра — твердый монолитный материал, образующийся в результате обработки нескольких слоев бумаги-основы пергаментирующим реагентом. Фибра выпускается двух видов: одно- и многослойная (склеенная), состоящая из нескольких отдельных слоев.

По назначению фибра подразделяется на следующие виды:

- **высокопрочная** — фибра с ограниченными показателями маслобензинопоглощения, предназначенная для особо прочных деталей;
- **кислородостойкая** — фибра для изготовления кислородостойких прокладок;
- **огнестойкая**;
- **касторово-глицериновая** — упругая и эластичная фибра, пропитанная касторовым маслом и глицерином, предназначенная для уплотнений в соединениях металлических конструкций и трубопроводов;
- **техническая** — легко штампуемая прочная фибра с ограниченной водопоглощаемостью, предназначенная для деталей машин и приборов;
- **электротехническая фибра** — с высокими показателями электрической прочности, применяемая в качестве электроизоляционного материала и др.

Электротехническая (электроизоляционная) фибра — сложенные вместе слои специальной бумаги, химически обработанной (желатинизированной) так, что слоистость практически исчезает, а полученная однородная масса переработанной целлюлозы не расслаивается после погружения на 30 мин в кипящую воду. Поставляется в виде рулонов, листов, труб и стержней, пригодных для использования в качестве электрической изоляции.

Выпускается трех типов:

А — характеризуется повышенной твердостью и жесткостью в сочетании с высокой плотностью, легко поддается механической обработке;

Б — общего назначения, обладает хорошими физическими и электрическими свойствами, удовлетворительно штамуется;

С (летероид) — предназначен для сложного перегибания и формования.

Гетинакс — материал, получаемый пропиткой различных сортов бумаги модифицированными фенольными, анилиноформальдегидными и карбамидными смолами. Гетинакс устойчив к действию химикатов, растворителей, пищевых продуктов, применяется при температурах до 120...140°C. По назначению подразделяется на *электротехнический* и *декоративный гетинакс*.

Гетинакс используется для внутренней облицовки пассажирских кабин самолетов, вагонов, судов, в строительстве, а также применяется в производстве трансформаторов, телефонов, деталей радиоаппаратуры, печатных схем, втулок, шестерен и др.

Текстолит — слоистые пластмассы, получаемые из связующего (фенолоформальдегидная смола) вещества и наполнителя (хлопчатобумажные ткани — шифон, миткаль, бязь и др.). Текстолит отличается прочностью, способностью поглощать шумы и гасить вибрации, хорошо сопротивляется раскалыванию, однако он может работать только при невысоких температурах (до 90°C). В зависимости от назначения текстолиты делят на *конструкционные* (зубчатые колеса, вкладыши подшипников, шкивы, втулки, прокладки в машиностроении), *электротехнические* (распределительные щиты и монтажные панели), *графитизированные* и др.

Древесно-слоистые пластики (ДСП) — искусственный древесный материал, изготовленный из лущеного шпона, пропитанного и склеенного резольным фенолоформальдегидным полимером. Существенная анизотропия свойств материала достигается при одинаковом расположении волокон в смежных слоях, и, наоборот, одинаковые механические свойства в разных направлениях обеспечиваются при взаимно перпендикулярном расположении волокон.

Древесно-слоистые пластики отличаются от исходной древесины и фанеры большей плотностью (1250...1330 кг/м³) и высокими механическими свойствами: предел прочности при растяжении вдоль волокон «рубашки» 140...260 МПа, при изгибе — 150...280 МПа; удельная ударная вязкость — 3...8 МПа; имеют высокое сопротивление истиранию. ДСП обладают высокой теплостойкостью и низкой теплопроводностью — 0,16...0,28 Вт/(м·К); водопоглощение за 24 ч — 5...10%. Эти пластики немагнитные, стойки к действию масел, растворителей, моющих средств, но чувствительны к влаге.

ДСП применяют при производстве радио- и электроприборов, а также в строительных и машиностроительных несущих конструкциях, вспомогательных, крепежных и монтажных элементах, от которых требуются химическая стойкость, немагнитность, высокое сопротивление истиранию (шкивы, втулки, ползуны лесопильных рам, корпуса насосов, подшипники, детали автомобилей и железнодорожных вагонов, лодок, матрицы для вы-

тяжки и штамповки). Шестерни из ДСП долговечны, подшипники из ДСП не образуют задиров при работе их в паре с металлическими изделиями. Снижается уровень шума.

Стеклопластики — пластмассы, содержащие в качестве упрочняющего (армирующего) наполнителя стекловолоконистые материалы. В некоторые стеклопластики для повышения вязкости полимерного связующего, уменьшения усадки, придания затвердевшим композициям необходимой жесткости и твердости, а также соответствующего декоративного вида вводят инертные наполнители: каолин, маршаллит, тальк, слюду и др.

Выбор связующего вещества для стеклопластиков определяется условиями их изготовления и эксплуатации. Стеклопластики на формальдегидном связующем веществе имеют более высокие теплостойкость и электроизоляционные свойства, чем текстолит, но недостаточно вибропрочны. Эпоксидные смолы обеспечивают наиболее высокие механические свойства и не требуют высокого давления при прессовании, что позволяет изготавливать крупногабаритные детали. Кремнийорганические смолы придают небольшую механическую прочность, но высокую тепло-, морозо- и коррозионную стойкость.

Промышленность выпускает три разновидности стеклопластиков на основе: 1) рубленых неориентированных волокон, 2) ориентированных длинных волокон и 3) тканей.

Изделия с использованием неориентированных или ориентированных длинных волокон, уложенных прядями, называются *стекловолокнитами*, а изделия из тканей или длинных волокон, склеенных между собой в виде стеклянного шпона и уложенных как в фанере, — *стекло-текстолитами*.

Неориентированные стекловолокниты обладают изотропными прочностными характеристиками намного более высокими, чем в материалах с порошкообразным наполнителем, и могут прессоваться в изделия сложной формы, в том числе с металлической арматурой. Эти материалы используются как конструкционные в электротехнике и машиностроении (золотники, уплотнения насосов и др.).

Стеклопластикам свойственна большая (7...10%) неоднородность механических свойств, что обусловлено составом, структурой и технологией производства. В стеклотекстолитах сильно (в 2—10 раз) проявляется анизотропия свойств в продольном и поперечном направлениях.

Плотность стеклопластиков в 1,5—2 раза меньше, чем стекла, и в 1,5 раза — чем изделий из алюминиевых сплавов, существенно превышая последние по механической прочности (плотность стеклопластиков на основе рубленого стекловолокна 1400 кг/м³).

Прочность при растяжении стеклотекстолитов плотностью 1800... 2000 кг/м³ составляет 1000 МПа. Прочность стеклопластиков на изгиб

и растяжение в 5—10 раз больше, чем у стекла. Модуль упругости стеклопластиков — 18 000...58 000 МПа, что в 10—20 раз больше модуля упругости полимера. Они в несколько десятков раз больше, чем стекло, стойки к ударным воздействиям. Отношение предела выносливости к плотности (удельная усталостная прочность) стеклопластиков примерно такое же, как у малоуглеродистой стали; они могут выдерживать длительные эксплуатационные нагрузки. Стеклопластики обладают высокой демпфирующей способностью, хорошо работают при вибрационных нагрузках.

Теплопроводность стеклопластиков в 6—10 раз ниже, чем у таких материалов, как керамика, бетон и железобетон. По значению температурного коэффициента линейного расширения ($10...25 \cdot 10^{-6}$) стеклопластики близки к легким металлам. Они могут длительно работать при температуре 200...400°C, однако кратковременно (≈ 10 с) выдерживают несколько тысяч градусов, являясь теплозащитным материалом.

Светопропускание стеклопластиков может достигать 90% при толщине 1,5 мм, в том числе до 30% — в ультрафиолетовом спектре против 0,5% для обычного и силикатного стекла.

Ориентированные стекловолокниты и стеклотекстолиты отличаются высокими прочностными характеристиками, выдерживают большие инерционные нагрузки, могут работать при температурах $-60...200^\circ\text{C}$. Из них изготавливают детали высокой точности с арматурой и резьбой.

Недостатками стеклопластиков являются склонность к старению и пониженная долговечность при эксплуатации в суровых климатических условиях.

Стеклопластики как конструкционный материал применяются в различных отраслях народного хозяйства. Стеклотекстолиты применяют в виде силовых изделий в авиационной и ракетной технике, в машиностроении и железнодорожной промышленности (несущие детали летательных аппаратов, кузова и кабины автомашин, автоцистерны, железнодорожные вагоны, корпуса лодок, судов, кожухи, защитные ограждения, вентиляционные трубы, контейнеры и др.).

В строительстве стеклопластики применяют в виде плоских и волнистых листов (стеклотекстолиты, полиэфирные стеклопластики и др.) для устройства светопрозрачной кровли промышленных зданий и сооружений, теплиц и оранжерей; малых архитектурных форм; трехслойных светопрозрачных и глухих панелей ограждений и покрытий; оболочек и куполов; изделий коробчатого и трубчатого сечений; оконных и дверных блоков; санитарно-технических изделий; форм для изготовления бетонных и железобетонных изделий и др.

Металлоорганопластики (алоры) — материалы из чередующихся слоев алюминиевого сплава и армированного композиционного полимерного материала (слоя органопластика), выполняющего комплекс разнообраз-

ных функций, и прежде всего, функцию внутреннего стопора усталостных трещин.

Механические свойства алора зависят от его структуры: $\rho = 2350 \dots 2450 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_B = 500 \dots 1000 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 350 \dots 550 \text{ МПа}$; $E = 64 \dots 70 \text{ ГПа}$.

Алора — материал с повышенной долговечностью, стойкостью к вибрационным нагрузкам и высокими звукоизолирующими свойствами, что позволяет использовать его в конструкциях вагонов скоростных поездов, метро, автомобилей и тракторов. Замена в алорах традиционных алюминиевых сплавов с тканым арамидным наполнителем обеспечивает снижение массы конструкции на 10...20%.

5.3.2. Пластмассы с волокнистым наполнителем

Органоволокниты — композиционные материалы, состоящие из полимерного связующего вещества и синтетических волокон в качестве упрочнителей. В комбинированных материалах, наряду с синтетическими волокнами, применяют минеральные (стеклянные, карбо- и бороволокна). Такие материалы обладают большей прочностью и жесткостью.

Структура органоволокнитов бездефектна, а пористость не превышает 1...3%, что обеспечивается диффузией компонентов и химическим взаимодействием между ними. Такая структура обеспечивает стабильность механических свойств органоволокнитов при резком перепаде температур, действии ударных и циклических нагрузок.

Органоволокниты обладают малой плотностью ($1200 \dots 1400 \text{ кг/м}^3$), прочностью при растяжении $300 \dots 3000 \text{ МПа}$, сравнительно высокими удельной прочностью и жесткостью ($E = 13 \dots 100 \text{ ГПа}$). Ударная вязкость высокая — $400 \dots 700 \text{ кДж/м}^2$. Органоволокниты имеют значительную длительность ресурса и надежность эксплуатации изделий при воздействиях механических, акустических и вибрационных ударов. Они обладают высокими диэлектрическими свойствами и низкой теплопроводностью. Большинство органоволокнитов может длительно работать при температурах $100 \dots 150^\circ\text{C}$ (до $200 \dots 300^\circ\text{C}$), отличается низкими показателями горючести и дымовыделения, устойчиво в агрессивных средах и во влажном тропическом климате.

Недостатком этих материалов являются сравнительно низкая прочность при сжатии и высокая ползучесть (особенно для эластичных волокон).

Органоволокниты применяют в качестве изоляционного и конструкционного материала в электро- и радиопромышленности, авиационной технике и машиностроении; из них изготавливают трубы, емкости для реактивов, покрытия корпусов судов и др.

Карбоволокниты — композиционные материалы на основе полимерного связующего (матрицы) и упрочнителей в виде углеродных воло-

кон. Допускается совместное использование углеродных и стеклянных волокон — *карбостекловолоконитов*.

В качестве матрицы используются синтетические полимеры (*полимерные карбоволокниты*); синтетические полимеры, подвергнутые пиролизу (*коксованные карбоволокниты*); пиролитический углерод (*пироуглеродные карбоволокниты*).

Коксованные карбоволокниты получают из обычных полимерных карбоволокнитов, подвергнутых пиролизу в инертной или восстановительной атмосфере. При температурах 800...1500°C образуются *карбонизированные карбоволокниты*, а при 2500...3000°C — *графитизированные карбоволокниты*. Образующийся при пиролизе связующего вещества кокс имеет высокую прочность сцепления с углеродными волокнами. В связи с этим коксованные карбоволокниты обладают высокими механическими и абляционными свойствами, стойкостью к термическому удару.

Для получения *пироуглеродных карбоволокнитов* упрочнитель выкладывается в печь, в которую пускается газообразный углеводород (метан). При определенном режиме метан разлагается и образующийся пиролитический углерод осаждается на волокнах упрочнителя, связывая их.

Углеродные волокна делятся на *карбонизированные* (80...90% С) и *графитизированные* (80...90% С). Характерный элемент их структуры — закрытые поры, которые могут составлять до 33% объема волокна. Поры имеют игловидную форму и ориентированы вдоль оси волокна. Их средняя длина — $(2...3) \cdot 10^{-2}$ мкм, а диаметр — $(1...2) \cdot 10^{-3}$ мкм. Увеличение числа пор снижает прочность волокна при растяжении.

Углеродные волокна имеют очень высокую энергию связи С — С, что позволяет им сохранять прочность при очень высоких температурах (в нейтральной и восстановительной средах — до 2200°C), а также при низких температурах. Углеродным волокнам присущи высокая теплоустойчивость, низкие коэффициенты трения и термического расширения, высокая химическая стойкость и электрические свойства — от полупроводников до проводников.

Углеродные волокна, применяемые для армирования конструкционных материалов, условно делятся на две группы: *высокомодульные* ($E = 300...700$ ГПа, $\sigma_b = 2...2,5$ ГПа) и *высокопрочные* ($E = 200...250$ ГПа, $\sigma_b = 2,5...3,2$ ГПа).

Карбоволокниты с полимерной матрицей типа КМУ-1, КМУ-2, КМУ-2л и др. имеют небольшую плотность (1300...1550 кг/см³) и сравнительно высокие механические свойства: $\sigma_b = 380...1020$ МПа, $\sigma_{изг} = 800...1200$ МПа при ударной вязкости 44...84 кДж/м². Причем после воздействия на воздухе рентгеновского излучения механические свойства этих карбоволокнитов не изменяются. Их теплопроводность в 1,5—2 раза выше, чем теплопроводность стеклопластиков. Они отличаются высокими статическим и динамическим сопротивлениями усталости, водо- и химически стойки.

Их электрические свойства: $\rho_{ov} = 0,0024 \dots 0,0034$ Ом · см (вдоль волокон); $\varepsilon = 10$ и $\operatorname{tg} \delta = 0,01$ (при частоте тока 10^{10} Гц).

Карбоволокниты с углеродной матрицей типа КУП-ВМ по значениям прочности и ударной вязкости в 5—10 раз превосходят специальные графиты, причем прочность при нагреве в инертной атмосфере и вакууме сохраняется до 2200°C , а при нагреве на воздухе начинается окисление при 450°C и изделия требуют специального покрытия. Коэффициент трения изделий из карбоволокнитов при работе в паре высок (0,35...0,45), а величина износа мала (0,7...1 мкм на торможение).

Карбоволокниты с полимерной матрицей используют в судо- и автомобилестроении (кузова машин, шасси, гребные винты, подшипники, панели отопления), а также для изготовления деталей аппаратуры химической, радио- и электронной промышленности, рентгеновского оборудования и др. Карбоволокниты с углеродной матрицей заменяют различные типы графитов для тепловой защиты, изготовления дисков авиационных тормозов, химически стойкой аппаратуры.

Бороволокниты — композиционные материалы на основе полимерного связующего вещества и упрочнителя (борных волокон). Иногда в качестве упрочнителя применяют комплексные боростеклониты, где несколько параллельных борных волокон оплетаются стеклонитью, придающей формоустойчивость и улучшающей технологические свойства материала. Связующим веществом служат эпоксидные, полиэфирные, фенолоформальдегидные и другие смолы.

Ячеистая микроструктура борных волокон обеспечивает высокую прочность при сдвиге на границе раздела с матрицей.

Бороволокниты плотностью $2000 \dots 2100$ кг/м³ отличаются высокой прочностью при сжатии ($920 \dots 1500$ МПа), сдвиге ($1250 \dots 1750$ МПа) и срезе, низкой ползучестью, высокими твердостью и модулем упругости. Прочность их при сжатии в 2—2,5 раза больше, чем карбоволокнитов. Кроме того, они обладают повышенной тепло- и электропроводностью: $\lambda = 43$ кДж/(м · К); $\alpha = 4 \cdot 10^{-6}$ C⁻¹ (вдоль волокон); $\rho_{ov} = 1,94 \cdot 10^7$ Ом · см; $\varepsilon = 12,6 \dots 20,5$ и $\operatorname{tg} \delta = 0,02 \dots 0,051$ (при частоте тока 10^7 Гц), а также высокими сопротивлениями усталости, стойки к воздействию радиации, воды, органических растворителей и горюче-смазочных материалов.

Изделия из бороволокнитов имеют высокую работоспособность в условиях повышенных температур. Бороволокниты КМБ-1 и КМБ-1к предназначены для длительной работы при температуре 200°C ; КМБ-3 и КМБ-3к не требуют высокого давления при переработке и могут работать при температурах не выше 100°C ; КМБ-2к работоспособен при 300°C . Бороволокниты применяют в авиационной и космической технике (профили, панели, роторы и лопатки компрессоров, лопасти винтов и трансмиссионные валы вертолетов и др.).

5.3.3. Пластмассы без наполнителя

Органическое стекло — полярный аморфный полимер полиметилметакрилат (температура стеклования $t_{ст} = 114^{\circ}\text{C}$). Применяется в интервале температур от -180 до $+80^{\circ}\text{C}$.

Преимущества органического стекла: сочетание легкости (в 2 раза легче силикатных стекол), прочности (по прочности на изгиб превосходит силикатное стекло в 7 раз) и прозрачности (пропускает свыше 99% солнечного света), легкость обработки резанием (а также склеивается, сваривается, полируется), возможность окрашивания и красивый вид изделия. По прочности и жесткости органическое стекло лучше многих термопластов; его ударная вязкость невелика — $1,2...2,0 \text{ Н} \cdot \text{см}^2$, но она мало меняется во всем интервале рабочих температур. Органическое стекло стойко к щелочам, разбавленным кислотам, топливу, смазкам. В воде оно немного набухает (поглощает до 2% воды при 100% влажности), но это мало отражается на его свойствах. Растворимо в дихлорэтане и других растворителях, поэтому легко склеивается. Исключительно стойко против атмосферного старения.

Недостатки органического стекла: невысокая стойкость в кислых средах, низкая теплостойкость, горючесть (при температурах выше 300°C), склонность к растрескиванию под напряжением — появление «серебра», т.е. участков с мелкими трещинами, на которых полностью отражается свет. Плохо сопротивляется истиранию.

Органическое стекло применяют для остекления промышленных зданий, светотехнических устройств и световодов, светильников, часовых стекол, автомобильных фар, предохранительных щитков на станках и машинах. Как диэлектрик органическое стекло применяют для изготовления изделий, сочетающих электрическую прочность и стойкость против старения. Благодаря способности выделять большое количество газов под действием дуги стекло используют также в качестве твердого дугогасящего материала.

Для увеличения прочности, ударной вязкости и сопротивления растрескиванию листы органического стекла подвергают двухосной вытяжке.

5.3.4. Пластмассы с газовоздушным наполнителем

Газовоздушные (ячеистые) пластмассы получают из термопластичных и термореактивных полимеров химическим и физическим способами. При химическом способе ячеистая газонаполненная структура образуется при термическом разложении газообразователей или взаимодействии компонентов, при физическом способе — в результате интенсивного расширения растворенных газов при снижении давления или повыше-

ния температуры, а также их механического диспергирования. В газоздушных пластмассах поры занимают 90...98% объема материала.

Газовоздушные пластмассы подразделяют в зависимости от характера пор на **пенопласты** и **поропласты** (торговое название в России — *полиуретан*). Пенопласты имеют преимущественно закрытые поры в виде ячеек, разделенных тонкими перегородками, а поропласты имеют сообщающиеся поры. Существуют материалы и со смешанной структурой.

Плотность ячеистых пластмасс зависит от плотности полимера и содержания газообразователя и составляет 10...200 кг/м³. Наиболее легкими являются карбамидные поропласты (например, *минора* имеет плотность 10...20 кг/м³).

Ячеистые пластмассы в большинстве случаев разрушаются постепенно и не имеют четко выраженного предела прочности. Прочность их определяют обычно при относительной деформации, составляющей 2...10%. Сравнительно высокие прочностные показатели имеют полистирольные и поливинилхлоридные пенопласты. При плотности 40...70 кг/м³ предел их прочности при сжатии достигает 0,3...1 МПа, а при растяжении — 0,8...1,9 МПа. Жесткие пено- и поропласты гибки и эластичны. Прочностные показатели ячеистых пластмасс снижаются при увлажнении.

Для них характерны повышенные деформации ползучести, особенно интенсивные при больших нагрузках и воздействии атмосферных факторов.

Ячеистые пластмассы очень малотеплопроводны ($\lambda = 0,026...0,58$ Вт/(м · К)). Теплостойкость пено- и поропластов на основе термопластичных полимеров составляет 60...70°C. Наиболее теплостойки кремнийорганические пенопласты: температура их эксплуатации достигает 250°C. Большинство газоздушных пластмасс горючи.

Ячеистые пластмассы имеют высокое водопоглощение (малым водопоглощением отличаются материалы с замкнутыми ячейками) и в то же время отличаются водостойкостью и не загнивают. Наибольшую атмосферостойкость имеют полистирольные и поливинилхлоридные пенопласты, пониженную — фенольные.

Пенопласты радиопрозрачны. Поропласты при обычных температурных условиях имеют хорошее звукопоглощение, так, например, у пористого полиуретана (поролона) плотностью 30...75 кг/м³ при толщине 50 мм коэффициент звукопоглощения равен 0,9 на частоте 500 Гц.

Пенопласты применяют для теплоизоляции кабин, контейнеров, приборов, холодильников, рефрижераторов, труб и др. В строительстве они используются при производстве труднозатопляемых изделий, а в радио- и электронной технике — для заливки деталей, так как пенопласт, являясь легким наполнителем, повышает удельную прочность, жесткость и виброустойчивость силовых элементов конструкций.

Поролон применяют при изготовлении амортизаторов, мягких сидений, а в строительстве — в виде плит и скорлуп для утепления стен и покрытий, теплоизоляции промышленного оборудования и трубопроводов при температурах до 60°C.

5.3.5. Стандартизированные изделия из пластмасс

Полимерные пленочные материалы выпускаются толщиной до 1 мм, отличаются малой массой, химической стойкостью, водонепроницаемостью и прочностью. Наиболее высокие физико-химические свойства у полипропиленовых пленок: предел прочности при растяжении 25...30 МПа, относительное удлинение при разрыве 500...700%, водопоглощение за 24 ч 1,5%. Полипропиленовые пленки сохраняют эластичность до -20°C. Для поливинилхлоридных пленок предел прочности на растяжение — 10...15 МПа; относительное удлинение при разрыве — 100...300%; водопоглощение за 24 ч 0,15...0,2%.

Для гидроизоляции используются в основном полиэтиленовые и поливинилхлоридные пленки, в которые для замедления старения и предохранения от грызунов добавляют каменноугольный пек.

Декоративно-отделочные пленки изготавливают главным образом из поливинилхлорида. При обычных температурах эти материалы обладают гибкостью и эластичностью, малой водо-, паро- и газопроницаемостью, достаточно долговечны.

Пленки на звукоизолирующей подоснове используют для отделки помещений с повышенными акустическими требованиями. На обратной стороне самоклеящихся поливинилхлоридных пленок нанесен специальный клеевой состав, защищенный силиконизированной бумагой. Пленки могут быть с рисунками, имитирующими ценные породы древесины или ткань. Двухслойный рулонный материал, состоящий из верхней тисненой поливинилхлоридной пленки и нижнего бумажного слоя, называют *изопленом*.

Липкая изоляционная лента — поливинилхлоридный пленочный пластикат, покрытый слоем перхлорвинилового клея (100 г/м²). Предел прочности на разрыв — не менее 8 МПа; удельное объемное электросопротивление не менее 10¹³ Ом·см; липкость — не менее 30 с; морозостойкость — до -40°C. Выпускают ее четырех марок: ПХЛ-020; ПХЛ-030; ПХЛ-040; ПХЛ-045 — толщиной, соответственно, 0,2; 0,3; 0,4; 0,45 мм и шириной 15...50 мм.

Линолеум — рулонный материал из поливинилхлоридных, алкидных и других полимеров. В состав массы однослойного линолеума обычно входит 40...45% суспензионного поливинилхлорида, 19...23% пластификатора, 0,5...1% стабилизатора, 19...35% наполнителей (тальк, каолин, мел, барит, древесная или асбестовая мука), 5...15% пигментов. Лино-

леумы могут быть *безосновные* и *с подосновой* (тканевой, войлочной и других видов). Войлок и другие волокнистые материалы используются в качестве теплоизоляционной и звукопоглощающей подосновы. Линолеумы могут иметь поверхность, окрашенную в различные цвета, гладкую, с узором, блестящую, матовую, тесненую. Приклеивают линолеум к основанию битумными и другими мастиками.

Синтетические ковровые материалы — материалы с подосновой из поливинилхлорида, полиуретана или вспененного латекса с верхом из тканых и нетканых покрытий из синтетических волокон.

Ворсолан — нетканый двухслойный ворсовой синтетический ковровый материал с подосновой из пленки эмульсионного поливинилхлорида и с ворсовой пряжей из полипропиленовых или полиамидных волокон. Ворсолан можно клеивать и сваривать.

Ворсонит — рулонный одно- или двухслойный синтетический ковровый материал на основе холстов из полиэфиров, полиамидов и других полимеров. Его прочность при разрыве — не менее 2...2,5 МПа.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Полупроводниковые материалы — вещества (полупроводники), способные сильно изменять свои свойства (электрические, гальваномагнитные, термо- и фотоэлектрические, оптические и др.) в широком интервале температур, включающем комнатную $T \approx 300$ К, под влиянием незначительных внешних воздействий: температуры, давления, освещения, электрических и магнитных полей и др.

Для полупроводников характерна высокая чувствительность электропроводности к внешним воздействиям (свету, потоку быстрых частиц, сильным электрическим полям и др.), а также к содержанию примесей и дефектов строения. Полупроводниковые свойства проявляются только у особо чистых веществ. На свойства полупроводников сильное влияние оказывают даже мельчайшие количества примесей.

В настоящее время полупроводниковые материалы классифицируются по происхождению вещества, агрегатному состоянию, составу, технологии изготовления и возможности применения.

По происхождению вещества они могут быть *органическими* и *неорганическими*. Органические полупроводниковые вещества (антрацен, полиакрилонитрил, индиго и др.) отличаются высокой радиационной стойкостью и широко используются для изготовления термисторов, пьезоэлементов, детекторов инфракрасного излучения и других приборов. Более широкое применение получили неорганические полупроводниковые материалы.

По агрегатному состоянию этих материалов выделяют *твердые* и *жидкие полупроводниковые вещества*, а твердые в свою очередь делят на *кристаллические* и *аморфные* (стеклообразные).

По составу полупроводниковые материалы могут быть *простыми* и *сложными*. К простым относят такие полупроводники, как Ge, Si и Se, сложными являются, например, химические соединения типа $A_{III}B_V$ (InP, ZnS, GaAs), твердые растворы замещения (In_xGa_{1-x} , As_yP_{1-y}) и др.

По технологии изготовления полупроводниковые материалы выполняют в виде *монокристаллов, подложек и монослойных эпитаксиальных структур*.

Эпитаксией называется процесс ориентированного нарастания кристаллического слоя на ориентированной кристаллической пластине — подложке. Полученные в результате эпитаксиального процесса слои полупроводника, находящиеся на подложке из полупроводника или диэлектрика, называют *эпитаксиальной структурой*. По числу слоев полупроводника такие структуры могут быть одно- и многослойными.

По возможности применения полупроводниковые материалы могут рассматриваться и как *материал*, и как *полупроводниковый прибор*, готовый к практическому использованию. Критерием для отнесения продукции к материалу или прибору является характер потребительских свойств, которые могут быть материаловедческими (химический состав, структура, физико-химические свойства) или приборными (вольт-амперная характеристика, пробивное напряжение и др.).

Простые полупроводники. К этим материалам относятся 12 элементов: Bi, C (алмаз), Si, Ge, Sn, P, As, Sb, S, Se, Te, I. Наибольшее распространение получили кремний и германий.

Кремний — Si. Тип кристаллической решетки — алмаз. Температура плавления 1417°C. Плотность твердого кремния — 2330 кг/м³, жидкого при температуре плавления — 2530 кг/м³. Ширина запрещенной зоны при 300 К — 1,10 эВ. Собственная концентрация носителей зарядов — 10⁸ см³. Подвижность носителей заряда в беспримесном полупроводнике при 300 К: электронов — 1450 см²/(В·с), дырок — 480 см²/(В·с). Коэффициент термического расширения 6,0 · 10⁻⁶ К⁻¹. Кремний химически устойчив при нагреве на воздухе до 900°C, в воде нерастворим.

Плотность дислокаций в монокристаллических слитках кремния (ГОСТ 19658—81) менее 10 см², что позволяет считать их бездислокационными. Слитки кремния легируют бором (Б), создающим дырочный тип электропроводимости, фосфором (Ф) или сурьмой (С), создающими электронный тип электропроводимости.

Кремний является основным материалом для производства полупроводниковых приборов: выпрямительных, мощных и маломощных биполярных транзисторов, полевых транзисторов и приборов с зарядовой связью. Кремний применяют также для создания детекторов ядерных излучений, датчиков Холла и тензодатчиков. Достаточно большое значение ширины запрещенной зоны позволяет кремниевым приборам работать при температурах до 180...200°C.

Германий — Ge, химический элемент IV группы периодической системы элементов, атомный номер — 32, атомная плотность — 72,59. Серо-

вато-белое хрупкое кристаллическое вещество; кристаллизуется в кубическую решетку типа алмаза (плотность — 5327 кг/м^3 , $t_{\text{пл}} = 937,5^\circ\text{C}$). Концентрация носителей тока при 25°C равна $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^3$, ширина запрещенной зоны $0,665 \text{ эВ}$, удельное электрическое сопротивление монокристаллического германия равно $5,6...6,0 \text{ кОм/м}$.

Металлический германий устойчив на воздухе при комнатной температуре и быстро окисляется при температуре выше красного каления ($600...700^\circ\text{C}$) с образованием двуоксида; твердый германий не реагирует с азотом, водородом; жидкий германий при температурах $1000...1100^\circ\text{C}$ взаимодействует с водородом.

Германий — важный полупроводниковый материал для различных электронных приборов (диоды, транзисторы, фотодиоды, фоторезисторы и др.). Из него изготавливают линзы для ИК оптики, фотодиоды, фоторезисторы, дозиметры рентгеновской спектрометрии, преобразователи энергии радиоактивного распада в электрическую энергию и т.д. Некоторые сплавы германия с другими химическими элементами являются сверхпроводниками.

Органические полупроводники — твердые вещества, которые имеют (либо приобретают под влиянием внешних воздействий) электронную или дырочную проводимость и положительный температурный коэффициент электропроводности. К ним относятся *органические красители, ароматические соединения, полимеры с сопряженными связями, некоторые природные пигменты* (например, хлорофилл), а также *ион-радикальные соли*. Эти полупроводники существуют в виде монокристаллов, поликристаллов, аморфных порошков или пленок. Их удельное электросопротивление — $10^{18}...10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. У органических полупроводников с низкой электропроводностью наблюдается фотопроводимость.

Органические полупроводники находят применение в качестве светочувствительных материалов в микроэлектронике.

Аморфные полупроводники — аморфные вещества, обладающие свойствами полупроводников. Различают *ковалентные аморфные полупроводники* (Ge и Si, CaAs и др. в аморфном состоянии), *халькогенидные стекла* (например, $\text{As}_{31}\text{Ge}_{30}\text{Se}_{21}\text{Te}_{18}$), оксидные стекла ($\text{V}_2\text{O}_5 - \text{P}_2\text{O}_5$) и диэлектрические пленки (SiO_x , Al_2O_3 , SiN_4 и др.).

Аморфные полупроводники обладают рядом уникальных свойств. Например, у них ярко выражен эффект электрического переключения из высокоомного состояния в низкоомное и обратно. Этот эффект позволяет создавать элементы со временем срабатывания менее $10^{19}...10^{12} \text{ с}$.

Халькогенидные стекла благодаря прозрачности в инфракрасной области спектра и высоким значениям сопротивления и фоточувствительности применяются для изготовления электрофотографических пластин передающих телевизионных трубок и записи голограмм.

ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

7.1. Общие сведения

Пленкообразующие материалы — это растворы или расплавы полимеров, а также неорганические вещества, которые наносятся на какую-либо поверхность, и после твердения образуют прочные пленки, хорошо прилипающие к различным материалам.

В зависимости от назначения пленкообразующие материалы делятся на *клеящие*, применяемые для склейки различных материалов, и *герметики*, обеспечивающие уплотнение и герметизацию швов, стыков, емкостей и др.

В состав клеящих и герметизирующих материалов вводят наполнители. Их присутствие не только снижает усадку пленкообразующих материалов при твердении, но и придает клею или герметику необходимую консистенцию и форму (пласты, пленки или жгуты), повышает прочность соединения и улучшает условия теплопередачи. В качестве наполнителей используют порошки металлов, коллоидальный оксид кремния, древесную муку, стекловолокно, стеклоткани и ткани из синтетических волокон. Применение тканей позволяет получать тонкие клеевые пленки из твердеющих полимеров.

7.2. Клеящие материалы

Склеивание — метод получения неразъемного соединения деталей при помощи адгезионного взаимодействия клеящего материала с подложкой с последующим твердением клеевой прослойки.

Для хорошего адгезионного взаимодействия необходимо обеспечить контакт подложки и клея на молекулярном уровне. Для этого нужно, чтобы клей был жидким и смачивал подложку, а на поверхности склеивания не было загрязнения (оксидов, пленок и др.).

Клеевые соединения по сравнению с другими видами неразъемных соединений (заклепочными, сварными и др.) имеют ряд преимуществ:

- возможность соединения различных материалов (металлов и сплавов, пластмасс, стекол, керамики и др.) как между собой, так и в различных сочетаниях;
- атмосферостойкость и стойкость к коррозии клеевого шва;
- герметичность соединения;
- возможность соединения тонких материалов;
- снижение стоимости производства;
- экономия массы и значительное упрощение технологии изготовления изделий.

Наиболее эффективно клеевые соединения работают на сдвиг.

Недостатками клеевых соединений являются относительно низкая длительная теплостойкость (до 350°C); невысокая прочность склеивания при неравномерном отрыве; необходимость, как правило, подогрева при проведении склеивания; склонность к старению; токсичность.

В состав клеящих материалов входят следующие компоненты:

- *пленкообразующее вещество* (в основном термореактивные смолы, каучуки), которое определяет адгезионные свойства и основные физико-механические характеристики;
- *растворители* (спирты, бензин и др.), создающие определенную вязкость;
- *пластификаторы* для устранения усадочных явлений в пленке и повышения эластичности;
- *отвердители и катализаторы* для перевода пленкообразующего вещества в термостабильное состояние;
- *наполнители* в виде минеральных порошков, повышающих прочность соединения и уменьшающих усадку пленки;
- *ингибиторы и замедлители* — для предотвращения нежелательного затвердевания клея при хранении.

Для повышения термостойкости вводят порошки Al , Al_2O_3 , SiO_2 , для повышения токопроводимости — серебро, медь, никель, графит. Высоконаполненные клеевые составы называют *мастиками*.

Основные потребительские свойства клея — *вязкость, механическая прочность, водостойкость, химическая прочность, жизнеспособность, горючесть, токсичность, взрывоопасность*.

Вязкость клея (*рабочая консистенция*) определяет прочность клеевого соединения и значительно влияет на удобство работы с ним. Вязкость должна обеспечить протекание клея в неровности и поры приклеиваемого материала, но таким образом, чтобы его значительная часть осталась между склеиваемыми поверхностями.

Прочность клеящей пленки должна быть близка к прочности склеиваемых материалов, так как только выполнение этого условия обеспечит разрушение по одному из склеиваемых материалов, а не по клеевому слою.

Жизнеспособность клея — время, в течение которого клей, полученный смешением отдельных упаковок непосредственно перед применением, пригоден для нанесения и склеивания с заданными качественными показателями. Для органических клеев жизнеспособность в значительной степени определяется их биологической стойкостью.

Для клеев из синтетических (полиэфирных, эпоксидных, фенолоформальдегидных смол и др.) полимеров характерны высокая прочность склеивания и стойкость в различных средах. Клеи из природных полимеров (например, крахмала) отличаются невысокой устойчивостью к действию воды и микроорганизмов.

Смоляные клеи могут быть термореактивными и термопластичными. Они затвердевают в присутствии катализаторов и отвердителей при нормальной и повышенной температурах. При горячем склеивании происходит более полное твердение смолы и клеевое соединение приобретает прочность и теплостойкость. Теплостойкость повышают также введением минеральных наполнителей.

Смоляные клеи на основе термореактивных (фенолоформальдегидных, кремнийорганических, эпоксидных, полиуретановых и др.) смол дают прочные теплостойкие пленки, применяемые для склеивания силовых конструкций из металлов и неметаллических материалов. Так, в случае необходимости склеивания теплостойких резин на основе кремнийорганического каучука применяют клеи на основе кремнийорганических смол (клеи КТ-15, КТ-30, МАС-1В). Клеевые соединения могут работать при температурах 60...300°C.

Смоляные клеи на основе термопластичных смол (поливинилацетата, акрилатов и др.) имеют невысокие прочностные характеристики, особенно при нагреве, и применяются для несильных соединений неметаллических материалов.

Формальдегидные клеи делятся на две группы: *немодифицированные* и *модифицированные*. Немодифицированные формальдегидные клеи (ВИАМ Б-3, ВИАМ Ф-9, ЦНИИМОД-1, ИНИИПС-2 и др.) представляют собой композиции из резолов и отвердителей. Твердеют при нормальной температуре, а ее повышение ускоряет склеивание. Применяются для склеивания древесины, древесных пластиков, фанеры. Общий недостаток этих клеев — гидролизующее действие на целлюлозу древесины и других материалов, приводящее к ускорению старения.

Фенолкремнийорганические клеи содержат в качестве наполнителей асбест, алюминиевый порошок и др. Клеи являются термо- и водостойкими, обладают длительной прочностью и вибростойкостью. Клей КК-18М применяется для склеивания инструментов и позволяет увеличить их стойкость в 1,5...4 раза.

Клеи на основе эпоксидных смол делятся на две группы: *холодного* (Л-4, ВК-9, ЭПО и др.) и *горячего* (ВК-32-ЭМ, К-153, ФЛ-4С, ВК-1

и др.) *твердения*. Твердение клеев происходит с помощью отвердителей без выделения побочных продуктов, что почти не дает усадочных явлений в клеевой пленке. Эпоксидные клеи благодаря полярности обладают высокой адгезией ко всем материалам. Для них характерны хорошая механическая прочность, атмосферостойкость, устойчивость к топливу и минеральным маслам, высокие диэлектрические свойства. Клеи горячего твердения являются конструкционными, их применяют для склеивания металлов, ферритов, керамики, стеклопластиков. Эпоксидно-кремнийорганические клеи ТКМ-75, Т-73 используются для приклеивания режущих частей при изготовлении инструментов.

Термостойкие клеи получают на основе ароматических полимеров, содержащих гетероциклы (полибензимидазолов, полиимидов), и карборансодержащих полимеров. Карбораны представляют собой борорганические соединения, имеющие общую формулу $B_nC_2H_{n+2}$, по свойствам они близки к ароматическим полимерам. В настоящее время созданы карборансодержащие фенольные, эпоксидные, кремнийорганические и другие клеи.

Резиновые клеи представляют собой растворы каучука в органических растворителях. В состав клеев горячей вулканизации (140...150°C) входит *вулканизующий агент*. При введении в состав клеевой композиции активаторов и ускорителей получают *самовулканизующийся клей*, вулканизация в котором протекает при нормальной температуре. Соединения получают достаточно прочные; они отличаются высокими эластичностью и стойкостью к действию масел и топлив. Резиновые клеи применяются для склеивания резины с резиной или резины с металлом, стеклом и др. Распространенным конфекционным (т.е. не для промышленности, а для продажи широким слоям населения) резиновым клеем является раствор натурального каучука в бензине (ГОСТ 2199—78).

Неорганические клеи представляют собой концентрированные водные растворы неорганических полимеров в виде твердых порошков, которые сначала плавятся, а потом затвердевают, и дисперсионных смесей, которые затвердевают или при высыхании, или вследствие химического взаимодействия. Неорганические клеи являются высокотемпературными. Наибольшее распространение получили *фосфатные, керамические и силикатные клеи*.

Фосфатные клеи являются растворами фосфатов. Эти клеи могут изготавливаться с инертными или активными наполнителями. Температура твердения 20...250°C. Огнеупорность — 1000...1800°C. Эти клеи водо- и кислотостойки. Они применяются для склеивания различных металлов, графита и др. Термообработка фосфатных клеев с активными наполнителями (например, клей АФС с наполнителями ZrO_2 и Ti) может существенно (до 250 МПа) повышать предел прочности при сжатии.

Керамические клеи (фритты) являются тонкими суспензиями оксидов щелочных металлов (MgO , Al_2O_3 , SiO_2 и др.) в воде. Такие клеи после нанесения подсушиваются, затем при небольшом давлении нагре-

ваются до температуры плавления компонентов и выдерживаются в течение 15...20 мин. Прочность соединения сохраняется при температурах 500...1000°C.

Силикатные клеи (жидкое стекло) могут изготавливаться с различными наполнителями. Твердение происходит при 120°C за 1...2 ч. Они предназначены для склеивания разнородных материалов (металлов, стекла, керамики, асбеста, стекла с металлом). Прочность соединения металлов: $\sigma_{сж} = 455...1100$ МПа, $\sigma_{в} = 50...150$ МПа. При введении углеродистого волокна $\sigma_{изг} = 500$ МПа.

Клеи классифицируют по ряду признаков:

- *природе пленкообразующего вещества* (натуральные, в том числе, животные, растительные и минеральные, и синтетические вещества);
- *адгезионным свойствам* (универсальные, склеивающие различные материалы, и с избирательной адгезией);
- *условиям твердения* (холодное и горячее твердение, водотвердеющие и универсально-твердеющие клеи);
- *выпускной форме* (твердые, пастообразные, жидкие);
- *деформативности клеевого соединения* (жесткие и эластичные соединения);
- *отношению к нагреву* (термопластичные и термореактивные);
- *жизнеспособности клеевого материала*;
- *условиям эксплуатации клеевого соединения* (общего назначения, высокопрочные, водостойкие, коррозионностойкие, масло-, бензино- и растворителестойкие, светостойкие, температуростойкие, электро- и теплопроводные, электроизоляционные, вакуум-плотные, оптически прозрачные и др. специального назначения).

Чаще всего используют классификацию по природе пленкообразующего вещества.

Клеи выпускаются в твердом (пленки, порошки; прутки), пастообразном и жидком (растворы, эмульсии) видах. Твердые клеи перед употреблением расплавляют или наносят на нагретые поверхности.

7.3. Герметики

Герметики (герметизирующие составы) — материалы и изделия, применяемые для уплотнения и герметизации клепаных, сварных и болтовых соединений, топливных отсеков и баков, различных металлических конструкций, стыковых сопряжений строительных деталей и конструкций и др. Основные требования к герметикам: высокая адгезия к материалам, эластичность и непроницаемость для различных сред, тепло- и морозостойкость, высокая химическая устойчивость.

Герметики классифицируют по составу (каучуковые, смоляные и каучуково-смоляные) и назначению (общего и специального назначения).

К наиболее распространенным каучуковым герметикам относятся *тиоколовые*, которые получают на основе полисульфидного каучука. Сера, входящая в состав основной молекулярной цепи, сообщает пленке высокую газо- и паронепроницаемость. У них высокая адгезия к металлам, древесине, бетону. Они стойки к топливу и маслам. Промышленностью выпускаются тиоколовые герметики У-30М и Ут-31. Срок службы этих герметиков 25 лет. Такие герметики применяют в авиационной и автомобильной промышленности, в судостроении, для строительной техники.

К смоляным герметикам относятся *анаэробные, кремнийорганические, эпоксидные* и др.

Анаэробные герметики (*анатерм, унигерм*) получают на основе полиакрилатов. Эти герметики при затвердевании не дают усадки и не требуют больших давлений. Пленка герметиков стойка к вибрации и ударам, они могут работать в агрессивных средах, при высоких давлениях, длительно при температурах $-200...+200^{\circ}\text{C}$, кратковременно до температуры 300°C . Прочность соединения при сдвиге в случае использования анатерма $6...17,5$ МПа. Анаэробные герметики применяются для герметизации микродефектов в сварных соединениях, отливках, штампованных деталях, для контровки болтов, резьбовых соединений, герметизации трубопроводов и др.

Кремнийорганические герметики (*виксинт, эластосил*) отличаются повышенной теплостойкостью. Так, виксинт применяется для поверхностной герметизации металлических соединений, в электро-, радиоаппаратуре, для внутришовных клепаных и сварных соединений; может работать при температурах $-6...+200^{\circ}\text{C}$; обладает диэлектрическими свойствами.

Эпоксидные герметики хорошо работают при вибрационных и ударных нагрузках, в условиях тропической влажности. Они могут быть холодного и горячего твердения. Герметики холодного твердения способны длительно работать при температурах от -60 до $+75^{\circ}\text{C}$, а горячего — от -60 до $+140^{\circ}\text{C}$. Эпоксидные герметики применяются для герметизации металлических и стеклопластиковых изделий. Герметик УП-5-122АТ стоек к топливу и маслам, УП-6-103 используется в шахтной аппаратуре, УП-5-105-2 — в электрорадиотехнических изделиях.

К группе каучуково-смоляных герметиков относятся, например, *фторкаучуковые герметики*, основой которых служат низко- и среднемолекулярные каучуки (Ф-4Д, СКФ-26 и др.). У них исключительно высокие герметизирующие свойства, а также кислото-, масло-, топливо-, тепло- и паростойкость. Длительно они могут работать при температуре 250°C , а $100...200$ ч — при температуре 300°C . Эти герметики негорючи. Недостатками фторкаучуковых герметиков являются низкая пластичность,

невысокие морозостойкость (-22°C) и стойкость против большинства тормозных жидкостей. Основное применение эти герметики находят в автомобильной и авиационной промышленности.

В зависимости от состояния, в котором герметизирующие материалы вводят в шов, они подразделяются на *мастичные*, *погонажные* (эластичные прокладки) и *оклеечные* (ленты) *герметики*.

Мастичные герметики делятся на три группы. К первой группе относятся полимерные нетвердеющие мастики на основе полиизобутилена. Они работают в конструкции в том состоянии, в каком уложены в нее. Ко второй группе относятся эластомеры холодного твердения — тиоколовые, бутилкаучуковые, силиконовые, которые после введения в стык в пастообразном состоянии под влиянием вулканизирующих добавок при температуре окружающей среды переходят в эластичное резиноподобное состояние. В третью входят битумно-полимерные герметики, применяемые в горячем виде.

Погонажные герметики — пористые или пустотелые элементы, выполненные в виде жгутов различного поперечного сечения из различных резиновых смесей (*пороизол*, *гернит* и др.). Использование этих герметиков эффективно при определенном (не менее 30...50% диаметра) обжатии их в стыках.

Оклеечные (рулонные) герметики представляют собой полосы из стеклоткани с нанесенным на них герметизирующим слоем мастики.

К группе герметиков специального назначения относятся *компаунды* — полимерные композиции на основе различных полимеров или мономеров, предназначенные для заливки или пропитки токопроводящих схем и деталей с целью их изоляции в электро- и радиоаппаратуре. Компаунды не содержат растворителей. Они могут быть термореактивными (на основе эпоксидных, полиэфирных и других смол) и термопластичными (на основе битумов, воскообразных диэлектриков и термопластичных полимеров — полистирола, полиизобутилена и др.). Наибольшей нагревостойкостью обладают эпоксидные и кремнийорганические компаунды.

7.4. Лакокрасочные защитные материалы

7.4.1. Общие сведения

Лакокрасочными материалами называют вязкожидкие составы, наносимые на поверхность конструкции тонким слоем (60...600 мкм), который через некоторое время твердеет и образует пленку, плотно сцепляющуюся с основанием. Основными компонентами лакокрасочных материалов являются *пигменты*, *наполнители* и *пленкообразующие вещества*.

Пигмент для лакокрасочных материалов — вещество в виде мелкодисперсных частиц, практически нерастворимое в лакокрасочной среде, которое используется благодаря своим оптическим, защитным или декоративным свойствам. Пигменты определяют не только цвет, но и технологичность (например, усадку) и долговечность лакокрасочного покрытия.

Лакокрасочная среда — совокупность компонентов, составляющих жидкую фазу краски (лака).

Пигменты бывают *минеральные* (природные и искусственные), *органические* и *металлические*.

Минеральные природные пигменты получают путем обогащения и измельчения природного сырья. К ним относятся мел природный, сухая охра (глина с содержанием более 15% оксида железа FeO), сурик железный (Fe_2O_3), графит серый и др.

Минеральные искусственные пигменты получают путем химической переработки природного сырья. К этой группе относятся диоксид титана TiO_2 , белила цинковые, литопон (смесь сернистого цинка и сернокислого бария), крон цинковый, сурик цинковый, ультрамарин, оксид хрома, сажа газовая и др.

К органическим пигментам, используемым в красках, относятся пигменты желтый; прочный лимонного цвета; оранжевый прочный; красный, алый; голубой фталоцианитовый, светло-синего цвета лак рубиновый; и т.п. Органические пигменты с большой красящей способностью часто разбавляют тонко измельченными минеральными наполнителями (мелом, известняком, гипсом и др.), не снижающими атмосферостойкости покрытия.

Металлические пигменты применяются в виде металлических порошков (алюминиевая пудра, бронзовый порошок). Хорошими свойствами обладают молибденовые и вольфрамовые краски, например «*молибден оранжевый*» — полиграфическая краска огромной кроющей способности, блестящего оранжевого цвета, устойчивая на свету и при нагревании. Из гетерополисоединений молибдена и вольфрама получают цветные лаки синих тонов, устойчивые к атмосферным воздействиям, однако не очень долговечные, блекнущие и выгорающие на свету.

Основными потребительскими свойствами пигментов являются *цвет, свето- и атмосферостойкость, красящая способность, укрывистость, тонкость помола, химическая стойкость, огнестойкость, антикоррозионная способность, маслостойкость* и др. К потребительским свойствам лакокрасочных материалов относятся также *время и степень высыхания, способность шлифоваться и полироваться* и др.

Красящая способность — свойство пигмента передавать свой цвет в смеси его с белыми, черными и синими пигментами.

Укрывистость (кроющая способность) — способность краски при равномерном ее нанесении на одноцветную поверхность делать невидимым цвет

последней или, в случае ее нанесения на черно-белую подложку, уменьшать контрастность между черной и белой поверхностями до исчезновения разницы между ними.

Тонкость помола пигмента сильно влияет на его красящую способность и укрывистость.

Наполнитель для лакокрасочных материалов — порошкообразное вещество, обычно белое или слабоокрашенное, практически нерастворимое в лакокрасочной среде, имеющее показатель преломления менее 1,7, которое используется благодаря своим физическим или химическим свойствам. Наполнители, как правило, *неорганические природные* или *синтетические вещества*, применяемые для улучшения технологических и потребительских свойств покрытий и экономии пигментов. Наполнители придают лакокрасочным материалам прочность, атмосферо- и огнестойкость и др. В качестве наполнителей используют каолин, молотый тальк, диабаз, асбестовую пыль, волокно и др.

Пленкообразующее вещество для лакокрасочных материалов — нелетучая часть лакокрасочной среды, которая образует пленку и связывает пигмент. В качестве пленкообразующих веществ используют жидкие или доведенные до жидкого состояния твердые материалы, которые после твердения (высыхания) связывают между собой частицы пигментов и наполнителей и образуют тонкую окрасочную пленку, прочно сцепляющуюся с окрашиваемой поверхностью. Пленкообразующее вещество — главный компонент красочного состава, который определяет рабочую консистенцию краски, прочность, твердость и долговечность образующейся пленки.

Пленкообразующие вещества подразделяют на *связующие вещества для водных окрасочных составов* (клеи, известь, цемент), *связующие вещества для неводных окрасочных составов* (олифы, лаки, смолы) и *эмульсии (водомасляные и синтетические)*. Связующие вещества для водных окрасочных составов твердеют как за счет испарения содержащейся в них воды, так и за счет химических процессов — карбонизации, гидратации, кристаллизации и др.

Вспомогательными веществами для производства лакокрасочных материалов являются *сиккативы, отвердители, пластификаторы, растворители, разбавители* и др.

Сиккатив — металлоорганическое соединение, растворимое в органических растворителях и пленкообразующих веществах, которое добавляется к продуктам, высыхающим за счет каталитического окисления, для ускорения процесса сушки.

Сиккативы являются катализаторами высыхания растительных масел и маслосодержащих лакокрасочных материалов, ускоряющими их пленкообразование при комнатных и повышенных температурах. Как правило, это соли металлов (свинца, марганца, цинка и др.) и жирных кислот масел, нафтенатов и др.

Отвердители — вещества, обуславливающие твердение некоторых жидких полимеров и их переход в твердые, нерастворимые и неплавкие полимеры.

Пластификатор — продукт, используемый для повышения эластичности твердеющей пленки. Пластификаторами служат вещества, повышающие пластичность, эластичность и мягкость полимеров и лакокрасочных полимерных материалов. Некоторые пластификаторы придают полимерным материалам негорючесть, влагостойкость и другие свойства. Пластификаторами являются дибутилфталат, нефтяные масла, канифоль и др.

Растворитель для лакокрасочных материалов — жидкость одно- или многокомпонентная, летучая в условиях сушки, в которой пленкообразующее вещество полностью растворяется. Растворители применяются для доведения малярных составов до рабочей вязкости, мытья посуды, кистей, инструментов и механизмов после работы с неводными составами. К растворителям относятся вода, скипидар, уайт-спирит, ацетон, спирт и др.

Разбавитель для лакокрасочных материалов — жидкость одно- или многокомпонентная, которая, не являясь растворителем для пленкообразующего вещества, может быть использована в сочетании с растворителем, не вызывая нежелательных эффектов.

Разбавители, в отличие от растворителей, содержат пленкообразующие вещества и служат для разбавления густотертых или разведения сухих неорганических красок. Разбавителями являются олифы, эмульсии.

Лакокрасочные материалы (ГОСТ 9825—73) классифицируют *по виду, химическому составу и назначению*.

Лакокрасочные материалы по виду делят на *лаки, краски* (в том числе порошковые краски и эмали), *грунтовки и шпатлевки*.

По химическому составу (по составу пленкообразующего вещества) лакокрасочные материалы классифицируют и обозначают таким образом: АБ — ацетобутиратцеллюлозные; АД — полиамидные; АК — полиакриловые; АС — алкидно-акриловые; АУ — алкидно-уретановые; АЦ — ацетилцеллюлозные; БТ — битумные; ВА — поливинилацетатные; ВЛ — поливинилацетальные; ВН — винил- и дивинилацетиленовые; ВС — сополимер-винилацетатные; ГФ — глифталевые; ИД — полиамидные; КО — кремнийорганические; КП — копаловые; КС — сополимер-карбинольные; КТ — ксифталевые; КФ — канифольные; КЧ — каучуковые; МА — масляные; МЛ — меламинные; МС — масляно- и алкидностирольные; МЧ — мочевиные; НП — нефтеполимерные; НЦ — нитроцеллюлозные; ПЛ — полиэфирные насыщенные; ПФ — пентафталевые; ПЭ — полиэфирные ненасыщенные; УР — полиуретановые; ФА — фенолоалкидные; ФЛ — фенольные; ФП — фторопластовые; ФР — фуриловые; ХП — хлорированные полиэтиленовые; ХС — сополимер-винилхлоридные; ХФ — перхлорвиниловые и поливинилхлоридные; ЦГ — циклогексановые; ШЛ — шеллачные; ЭП — эпоксидные;

ЭТ — этрифталевые; ЭФ — эпоксиэфирные; ЭЦ — этилцеллюлозные; ЯН — янтарные.

По назначению лакокрасочные материалы делят на группы в соответствии с табл. 13.

Обозначения основных лакокрасочных материалов состоят из пяти групп буквенно-цифровых знаков для эмалей, красок, грунтовок, шпатлевок и четырех групп знаков для лаков. Первая группа знаков определяет вид лакокрасочного материала и состоит из слова, например «эмаль», «лак» и др. Вторая группа знаков определяет пленкообразующее вещество и обозначается двумя буквами, например БТ, МА, ЭП и др. Для лакокрасочных материалов без активного растворителя между первой и второй группами знаков ставится индекс, определяющий разновидность материала: Б — без активного растворителя, В — водоразбавляемые, ОД — органодисперсные, П — порошковые, Э — водоэмульсионные. Индекс от второй группы знаков отделяется тире.

Таблица 13

**Классификация лакокрасочных материалов
по преимущественному назначению**

Лакокрасочные материалы	Обозначение группы	Преимущественное назначение (условия эксплуатации покрытий)
Атмосферостойкие	1	Покрyтия, стойкие к атмосферным воздействиям в различных климатических условиях, эксплуатируемые на открытых площадках
Ограниченно атмосферостойкие	2	Покрyтия, эксплуатируемые под навесом и внутри неотапливаемых помещений
Консервационные	3	Покрyтия, применяемые для временной защиты окрашиваемой поверхности в процессе производства, транспортирования и хранения изделий
Водостойкие	4	Покрyтия, стойкие к действию пресной воды и ее паров, а также морской воды
Специальные	5	Покрyтия, стойкие к излучениям; покрyтия светящиеся, пропиточные, окрасочные, противообрастающие, терморегулирующие и т.д.
Маслобензостойкие	6	Покрyтия, стойкие к воздействию минеральных масел и консистентных смазок, бензина, керосина и др.
Химически стойкие	7	Покрyтия, стойкие к воздействию щелочей, кислот и других жидких реагентов и их паров
Термостойкие	8	Покрyтия, стойкие к воздействию повышенных температур
Электроизоляционные	9	Покрyтия, подвергающиеся воздействию электрических тока, дуги и поверхностных разрядов

Третья группа знаков характеризует преимущественное назначение лакокрасочного материала и обозначается цифрой в соответствии с табл. 13. Третью группу знаков грунтовок и масляных густотертых красок обозначают цифрой 0, шпатлевок — цифрами 00. Между второй и третьей группами знаков ставится тире.

Четвертая группа знаков определяет присвоенный материалу порядковый номер и состоит из одной, двух или трех цифр. Для масляных красок вместо порядкового номера ставится цифра, определяющая вид олифы, на которой изготовлена краска: 1 — натуральная; 2 — оксоль; 3 — глифталевая; 4 — пентафталева; 5 — комбинированная. Иногда после порядкового номера допускается буквенный индекс, характеризующий особенности лакокрасочного материала, например М — матовый, ПМ — полуматовый, ГС — горячей сушки и т.д.

Пятая группа знаков характеризует цвет лакокрасочного материала и состоит из слова. При большом разнообразии оттенков одного и того же цвета цвет указывается порядковым номером, например зеленая — 1, зеленая — 2 и т.д.

Примеры обозначений лакокрасочных материалов: лак БТ-783; краска МА-025 зеленая; эмаль ХВ-113 голубая; грунтовка ГФ-020 красно-коричневая; шпатлевка ЭП-0010 красно-коричневая.

Лакокрасочные материалы применяют для защиты материалов от разрушительного воздействия среды, для архитектурной отделки фасадов зданий и создания красивого вида и необходимых санитарно-гигиенических условий в помещениях. Используются лакокрасочные материалы специального назначения: жароупорные, химически стойкие, антисептические и антикоррозийные и др.

7.4.2. Характеристика основных видов лакокрасочных материалов

7.4.2.1. Краски

Краска (эмаль) — жидкий или порошкообразный продукт, содержащий пигменты, который после нанесения на поверхность образует непрозрачную пленку, обладающую защитными, декоративными или специальными техническими свойствами.

Пленкообразующими веществами в красочных составах являются: в полимерных красках, лаках — полимеры; в каучуковых красках — каучуки; в нитролаках — производные целлюлозы; в масляных красках — олифы; в клеевых красках — клеи (животный и казеиновый); в цементных, известковых, силикатных красках — неорганические вяжущие вещества.

Краски по назначению подразделяют на *строительные, полиграфические, художественные и специальные* (светящиеся, термочувствительные, не обрастающие в воде морскими организмами и др.). К строительным краскам относятся *краски масляные, водоразбавляемые и эмалевые*.

Водоразбавляемые краски — это известковые, вододисперсионные, цементные, клеевые, силикатные и др.

Масляные краски — смеси пигментов и наполнителей на основе олифы, в которых каждая частица пигмента окружена адсорбированным на ее поверхности связующим веществом — олифой. Масляные краски образуют покрытия с удовлетворительной атмосферостойкостью, невысокой твердостью, медленно набухающие в воде и разрушающиеся в щелочах. Выпускают *густотертые* и *жидкотертые масляные краски*. Густотертые краски — в виде паст — доводят до рабочей вязкости добавлением олифы на месте работы; жидкотертые краски (титановые и цинковые белила) выпускают готовыми к употреблению с содержанием 40...50% олифы.

Масляные краски применяют с учетом вида олифы и пигмента, входящих в их состав. Они используются в основном в строительстве (наружная и внутренняя окраска по металлу, дереву, штукатурке и бетону), а также в живописи. Краски на натуральной олифе используются для защитной окраски стальных конструкций мостов и гидротехнических сооружений, стальных опор и др., а также для окраски оконных переплетов, полов и других деревянных элементов с целью предохранения древесины от увлажнения. Матовое покрытие получают, применяя вододисперсионные масляные составы более дешевые, чем масляная краска.

В цементных красках связующим веществом является белый портландцемент; пигменты должны быть щелочестойкими. Цементные краски применяют для наружных малярных работ и внутренней окраски влажных производственных помещений по бетону, кирпичу, штукатурке (окрашиваемую поверхность предварительно увлажняют).

В известковых красках пленкообразующим веществом служит гашеная известь. Пигменты применяют только щелочестойкие (охра и др.). Для успешной карбонизации извести в состав вводят *водоудерживающие добавки* (поваренную соль, хлористый кальций или алюминиевые квасцы). Известковые краски повсеместно применяют для окраски фасадов, но ее приходится часто возобновлять из-за слабой атмосферостойкости таких покрытий.

Силикатные краски — краски на основе жидкого стекла, т.е. в силикатных красках пленкообразующим веществом является силикат калия $K_2O \cdot mSiO_2$ в виде водного коллоидного раствора. В красочный состав входят, кроме связующего вещества, минеральный щелочестойкий пигмент (охра, железный сурик и др.) и кремнеземистый наполнитель (молотый кварцевый песок, диатомит или трепел), повышающий водостойкость пленки.

Силикатные краски применяются главным образом в строительстве для получения долговечных покрытий по штукатурке, кирпичу, бетону, камню.

Деревянные конструкции окрашивают силикатными красками для защиты от возгорания; их используют для окраски фасадов и внутри помещений.

Клеевые краски — краски на основе водных растворов эфиров целлюлозы, поливинилового спирта, крахмала, казеина. Клеевая краска представляет собой суспензию пигмента и наполнителя (мела) в коллоидном водном растворе клея. Твердение такого покрытия происходит по мере высыхания клеевого состава. При этом образуются пористые, обычно неводостойкие покрытия. Клеевые краски неводостойки; их применяют для внутренних малярных работ по сухой штукатурке и дереву. Казеиновые атмосферо- и водостойкие клеевые краски используют для окраски фасадов и получения моющихся покрытий.

Полимерной эмульсионной краской называют красочный состав из двух несмешивающихся жидкостей, в котором частицы одной жидкости (дисперсной фазы — *суспензии пигмента*) распределены в другой жидкости (дисперсионной среде — *растворе полимера*). Вокруг частиц дисперсной фазы образуется механически прочная оболочка, препятствующая их укрупнению и слиянию.

Эмульсии — дисперсные системы с жидкой дисперсионной средой и жидкой дисперсной фазой. Эмульсии с водной дисперсионной средой называются *прямыми* (например, водоэмульсионные краски), с водной дисперсной фазой — *обратными* (нефтяные эмульсии). Обязательный компонент эмульсионной краски — *эмульгатор*, т.е. поверхностно-активное вещество, которое адсорбируется одной из жидкостей на поверхности раздела фаз, понижая ее поверхностное натяжение.

Количество полимерного растворителя в таких красках 30...50%, что обеспечивает составу малярную консистенцию. После нанесения покрытия растворитель испаряется (улетучивается), и на окрашиваемой поверхности образуется атмосферостойкая пленка. Дисперсия полимера в летучем растворителе должна обеспечивать смачиваемость основания, тогда полимер проникает в его (бетона, кирпича и др.) поры, обеспечивая прочное сцепление образующейся пленки с основанием.

Полимерные эмульсионные краски быстро высыхают, однако при этом безвозвратно теряются летучие органические растворители. Большинство этих растворителей горючи, их пары огне- и взрывоопасны. Эти пары, накапливаясь в помещении, вредно влияют на здоровье людей. Полимерные эмульсионные краски поставляют в виде паст, которые на месте применения разбавляют водой до малярной консистенции. Вода после нанесения краски частично испаряется, частично впитывается основанием. В результате эмульсия распадается, образуя прочное гладкое матовое покрытие, водо- и светостойкое. Благодаря своей пористости эти покрытия газопроницаемы.

Водоземulsionные (латексные) краски содержат кроме пигмента и наполнителя водную дисперсию полимеров (полиакрилатов, поливинилацетата, сополимеров стирола с бутадиеном и др.). Эти краски нетоксичны, пожаро- и взрывобезопасны, так как не содержат органических растворителей. Применяются для окраски стен, транспортных средств, кожи, мебели.

Порошковая краска — сухая композиция пленкообразующего вещества с пигментами и наполнителями, создающими после наплавления, охлаждения и твердения твердую непрозрачную пленку.

Порошковую краску наносят на поверхность методом напыления. Преимущества перед жидкими красками — простота применения, легкость хранения и транспортировки. Порошковые краски наносят главным образом на термостойкие материалы — металлы, керамику, стекло, бетон.

7.4.2.2. Лаки

Лак — красочный состав в виде дисперсии пленкообразующего вещества (природной или синтетической смолы, битума, олифы) в летучем растворителе, который после нанесения на поверхность образует твердую прозрачную пленку, обладающую защитными, декоративными или специальными техническими свойствами. Кроме этих двух главных компонентов, лак обычно содержит пластификатор, отвердитель и другие специальные добавки, улучшающие его качество. Большинство лаков бесцветны, но применяют также лаки, окрашенные красителями и черные (на основе битумов и каменноугольных пеков).

Нитролаки — растворы производных целлюлозы в органических растворителях, обычно содержащие пластификатор. Нитролак быстро высыхает, образуя как бесцветную, так и коричневого или желтого цвета блестящую пленку. Используется для окраски деревянных изделий. Нитролаки огнеопасны и токсичны при использовании.

Спиртовые (смоляные) лаки и политуры — растворы синтетических (алкидных, полиуретановых и др.) или природных смол в спирте, имеющие коричневый, желтый или другой цвет. Покрытия эластичны, износостойки, обладают антикоррозионными и электроизоляционными свойствами. Их используют для полировки деревянных деталей, мебели, для покрытия изделий из стекла и металла. Этими лаками защищают также химическую и радиоэлектронную аппаратуру, детали судов и самолетов.

Битумно-смоляные лаки представляют собой растворы битумов и органических масел в органических растворителях. Образуют водостойкие пленки черного цвета. При добавлении алюминиевой пудры получают теплостойкую краску, идущую для окраски санитарно-технического оборудования. Битумно-смоляные лаки применяют для антикоррозионного покрытия металлических деталей санитарно-технического оборудо-

дования, канализационных и газовых труб; ими же покрывают «черные» скобяные изделия.

Битумно-масляные лаки имеют в своем составе растительные масла, улучшающие свойства покрытий (сохранение эластичности на морозе, большая долговечность). Они используются для окраски металлических конструкций и деталей (перил, оград и др.).

7.4.2.3. Грунтовки

Грунтовка — суспензия пигмента или смеси пигментов с наполнителями в пленкообразующем веществе, создающая после высыхания однородную непрозрачную пленку с хорошей адгезией к подложке и покрывным слоям и предназначенная для повышения защитных свойств системы покрытий.

Грунтовки образуют нижние слои лакокрасочных защитных покрытий, создавая надежное сцепление верхних слоев покрытия с окрашиваемой поверхностью. Кроме того, они защищают металл от коррозии, выявляют текстуру древесины, закрывают поры материала, выравнивают и создают однородную поверхность перед окраской. Высушенную загрунтованную поверхность покрывают краской или лаком.

7.4.2.4. Шпатлевка

Шпатлевка — продукт пастообразной или жидкой консистенции, применяемый для устранения небольших дефектов поверхности перед окраской.

Шпатлевка — густая вязкая масса, состоящая из смеси пигментов с наполнителями в связующем веществе. Различают *лаковые, масляные и клеевые шпатлевки*. Шпатлевкой заполняют неровности и выравнивают окрашиваемую поверхность. Ее наносят по слою высохшей грунтовки. Высохшую шпатлевку обрабатывают шлифовальной шкуркой.

Лакокрасочное покрытие обычно состоит из грунтовки, шпатлевки и покровных слоев красочного состава (лака, эмали или эмульсионной краски). Получили распространение покрытия, армированные волокнами или тканями (хлопчатобумажной, синтетической или стеклотканью — в зависимости от среды). Для создания более надежной защиты прибегают к утолщенным покрытиям — *обмазкам*.

Обмазки — смеси, приготовленные для защиты покрытия, например, на основе растворов химически стойких синтетических смол и портландцементов. К наиболее распространенным обмазкам относятся цементно-полистирольная и цементно-полихлорвиниловая; применяют также цементно-битумную мастику, цементно-казеиновую смесь, глинобитумную пасту и др.

7.4.2.5. Растворители для лакокрасочных материалов

Растворители для лакокрасочных материалов должны обладать следующими потребительскими свойствами: химической стойкостью, т.е. не должны взаимодействовать с растворяемым веществом; негигроскопичностью, так как даже небольшое количество воды затрудняет процессы склеивания, герметизации, окраски и др.; скоростью испарения, обеспечивающей необходимое течение технологического процесса; минимальными токсичностью и огнеопасностью.

В зависимости от принадлежности к видам химических соединений растворители подразделяют на *терпеновые, углеводородные, кислородсодержащие и хлорированные растворители*.

Терпеновые растворители получают при переработке сосновой древесины или смолы. Наибольшее распространение получил *скипидар* (ГОСТ 1571—82) — бесцветная, иногда с желтоватым оттенком жидкость плотностью 855...863 кг/м³. Температура кипения — около 150°C, а температура вспышки равна 30...32°C. Хорошо растворяет органические масла, канифоль, глифталевые, полиэфирные и эпоксидные смолы и их сополимеры со стиролом. Скипидар нетоксичен, но его пары при концентрации выше 0,3 мг/л вызывают головную боль. Из-за относительно высокой стоимости скипидар применяют ограниченно в отделочных работах.

К углеводородным растворителям, получившим наибольшее распространение, относятся легкие фракции, получаемые при перегонке сырой нефти: *керосин, бензин, бензин-растворитель (уайт-спирит)*.

Керосин — прозрачная бесцветная или желтоватая жидкость с голубым отливом плотностью 820...840 кг/м³. Растворяющая способность невелика. Из-за резкого запаха применяют только для растворения битума.

Бензин (ГОСТ 8505—57) — прозрачная, большей частью бесцветная жидкость с характерным запахом плотностью 700...780 кг/м³. Он легко испаряется и воспламеняется. Смесь его паров с воздухом взрывоопасна. Бензин выпускается разной степени очистки, показателем чего служит размер интервала температуры кипения: автомобильного бензина — 70...225°C, авиационного — 40...180°C, экстракционного — 80...120°C. Последние наименее токсичны.

Уайт-спирит (ГОСТ 3134—78) — средняя фракция между тяжелым бензином и тракторным керосином. Интервал температур кипения 150...210°C. Плотность 762...95 кг/м³. Эфиروцеллюлозные и некоторые эпоксидные составы уайт-спирит не растворяет. Имеет малую токсичность и невысокую стоимость.

К кислородсодержащим растворителям относятся органические соединения, в состав которых кроме углерода и водорода входят атомы кислорода: *спирты, сложные эфиры (ацетаты) и кетоны*. Кислород-

содержащие растворители хорошо растворяют нитроцеллюлозу, мочевино- и меламиноформальдегидные и виниловые полимеры.

Из спиртов в качестве растворителей чаще всего используют *метиловый* и *этиловый* (ГОСТ 17299—78) *спирты*. По химическому составу это простейшие углеводороды — метан CH_4 и этан C_2H_6 , у которых один атом водорода замещен гидроксильной группой OH . По внешнему виду это бесцветные прозрачные жидкости с характерным запахом. Плотность метилового спирта 793, а этилового — 791 кг/м^3 . Молекулярная масса, соответственно, равна 32,04 и 46,0; температура кипения — 64,5 и 78,5°C. С водой смешиваются в неограниченном количестве. Этиловый и метиловый спирты токсичны, особенно ядовит метиловый спирт. Хорошо растворяют масла и жиры.

Из сложных эфиров в качестве растворителей чаще всего применяют соединения спиртов с уксусной кислотой — *ацетаты*: *метилацетат* — из метилового спирта; *этилацетат* — из этилового спирта; *бутилацетат* — из бутилового спирта. Они представляют собой бесцветные жидкости с более или менее сильным сладковатым фруктовым запахом. Плотность метилацетата 935, этилацетата — 886 и бутилацетата — 872...883 кг/м^3 . Температуры кипения, соответственно, равны 60; 77,1; 118...128°C. Они хорошо растворяют нитроцеллюлозу, фенолоформальдегидные и фталево-глицериновые полимеры. Все они токсичны.

Кетоны составляют большую группу органических соединений, но в качестве растворителя широко применяют простейший из них — *технический ацетон* (ГОСТ 2768—84), представляющий собой бесцветную жидкость с характерным эфирным запахом и плотностью 790 кг/м^3 . При обычной температуре он легко испаряется. Ацетон хорошо смешивается в заданном соотношении с водой, спиртом, эфиром, минеральными и растительными маслами, бензином, керосином, скипидаром и некоторыми другими веществами. Хорошо растворяет органические смолы и большинство синтетических смол.

Из хлорированных углеводородов в качестве растворителя используют *дихлорэтан* — бесцветную жидкость со слабым запахом, плотностью 1250 кг/м^3 , с температурой кипения 84,5°C. Дихлорэтан — сильный растворитель. Горючесть его умеренная. Применяется редко, так как это сильно действующий яд.

8.1. Общие сведения

Целью смазывания зон трения является обеспечение преимущественно жидкостного трения, при котором потери на трение малы, а износ деталей практически отсутствует.

Смазочный материал — материал, вводимый на поверхности трения для уменьшения силы трения и (или) интенсивности изнашивания.

Смазочные материалы должны обладать строго заданными свойствами, которые определяются величинами удельной и полной нагрузок в зоне трения; максимальной, средней и объемной температурами в зоне контакта; кинематикой движения в зоне трения (качение, скольжение, смешанное). При этом должны учитываться природа материалов обоих деталей трения, характеристики волнистости и шероховатости поверхностей в зоне трения, свойства окружающей среды и др.

К основным показателям качества и работоспособности смазочных материалов относятся *вязкость* и *вязкостно-температурные свойства*, *стойкость к окислению* и *коррозионная стойкость*, *зольность*, *температуры застывания*, *вспышки* и *воспламенения*, *коксуемость*, *антипенные свойства*, *плотность*, *цвет* и др.

Вязкость жидкого смазочного материала — внутреннее трение, возникающее между его молекулами и слоями при их относительном перемещении под действием внешней силы. Различают *динамическую*, *кинематическую* и *условную вязкость*. Зависимость вязкости от температуры принято характеризовать отношением значений кинематической вязкости при 50 и при 100°С. Чем меньше это отношение, тем выше вязкостно-температурные свойства масла.

Коксуемость масла — это способность масла под влиянием высоких температур разлагаться с образованием твердых осадков (кокса).

По агрегатному состоянию смазочные материалы могут быть *жидкими*, *пластичными*, *твердыми* и *газообразными*. Наибольшее распространение получили жидкие смазочные материалы (*масла*) и пластичные смазочные материалы (*смазки*).

8.2. Смазочные масла

Смазочные масла как конструкционный материал узла трения выполняют следующие функции:

- 1) уменьшают трение, возникающее между сопряженными деталями;
- 2) снижают износ и предотвращают задиры трущихся поверхностей;
- 3) отводят тепло от трущихся поверхностей;
- 4) защищают поверхности трущихся деталей и другие неизолированные части от коррозионного воздействия окружающей среды;
- 5) уплотняют зазоры между сопряженными деталями;
- 6) удаляют из зоны трения продукты износа, коррозии и прочие загрязнения.

В зависимости от назначения и условий эксплуатации используемое масло должно надежно выполнять две-три основные функции.

По происхождению (способу получения) выделяют *нефтяные, синтетические и растительные масла*. В наибольших масштабах используются нефтяные масла, получаемые путем переработки нефтяного сырья. Синтетические масла, получаемые на основе углеводородного или других видов сырья, чаще используются в смеси с нефтяными маслами — *полусинтетические масла*.

В состав товарных масел часто входят кроме *основного компонента* (нефтяного, синтетического масла или их смеси) *специальные присадки и твердые антифрикционные добавки*. В качестве присадок используются органические соединения в количестве до 30%, улучшающие те или иные свойства (антиокислительные, моюще-диспергирующие, вязкостные, антифрикционные, противоизносные, депрессорные, противопенные и др.). В качестве твердых антифрикционных добавок (0,5...3,0%) используются графит, дисульфид молибдена, нитрид бора, некоторые селениды, сульфиды и иодиды металлов, а также высокодисперсные порошки металлов и их оксиды. Целью введения твердых добавок является повышение смазочной способности масел и их стабильности к окислению. Преимущество этих добавок состоит в том, что их действие проявляется как при низких, так и при высоких температурах.

Основными потребительскими свойствами смазочных масел являются *подвижность, индекс вязкости, стабильность к окислению, испаряемость, воспламеняемость, приемистость к присадкам, смазочная способность, совместимость с нефтяными основами, совместимость с уплотнительными материалами*.

Индекс вязкости (ИВ) — степень изменения вязкости масла в зависимости от температуры. Чем выше его значение, тем лучше масло.

По назначению выделяют следующие основные группы масел: *моторные, промышленные, трансмиссионные, турбинные, компрессорные,*

гидравлические, консервационные, для технологических операций и специального назначения.

К группе моторных масел относятся *масла для смазывания карбюраторных, дизельных и авиационных поршневых двигателей, а также универсальные.*

Индустриальные масла делят на четыре группы: 1) *для гидравлических систем; 2) для направляющих скольжения; 3) для зубчатых передач; 4) для шпинделей, подшипников и сопряженных с ними соединений.* Специфическими потребительскими свойствами индустриальных масел являются индекс задира, нагрузка сваривания, показатель износа и противоскачковые свойства.

Турбинные масла различаются по конструкции и мощности смазочных систем турбин: *гравитационные* (маломощные) и *напорные* (большой мощности). Турбинное масло подвергается воздействию температур 60...100°C в условиях контакта с кислородом воздуха и водой и в присутствии металлов, катализирующих процесс его окисления. С учетом условий эксплуатации к турбинным маслам предъявляются следующие потребительские требования: стойкость к окислению в условиях контакта с воздухом при температурах 100...120°C; отсутствие склонности к эмульгированию с водой; низкое пенообразование; хорошие смазывающие и противоизносные свойства; низкое кислотное число для свежего масла и в начале работы; большой коксовый остаток; отсутствие механических загрязнений, осадков и шламов; высокая температура вспышки.

Трансмиссионные масла предназначены для смазывания различного рода механических и гидравлических трансмиссий. Условия работы масел определяются конструкцией агрегата трансмиссий (цилиндрический, конический, спирально-конический и другие агрегаты).

Обозначения моторных, трансмиссионных и гидравлических масел установлены ГОСТ 17479.1—85, ГОСТ 17479.2—85 и ГОСТ 17479.3—85.

Компрессорные масла, применяемые в воздушных, газовых, холодильных компрессорах, воздухоудувках и вакуумных насосах разного типа и назначения, делятся на три основные группы: *для воздушных и газовых компрессоров; для холодильных компрессоров; для вакуумных насосов.* Потребительские требования к маслам для воздушных и газовых компрессоров определяются температурой сжимаемости газа, давлением сжатия и чистотой газа. Компрессорное масло должно обладать *термической и термоокислационной стабильностью, отсутствием склонности к коксообразованию и температурой вспышки на 50°C выше самой высокой рабочей температуры.* В масле не должно быть летучих компонентов, а масляный туман должен сразу оседать на стенках цилиндров, в противном случае может произойти взрыв паров масла. Компрессорное масло для холодильных компрессоров должно противостоять агрессивности хладагента, температура его застывания должна быть ниже минимальной рабочей температуры.

Консервационные масла применяются для защиты от коррозии и изнашивания металлоизделий, конструкционных материалов, запасных частей, инструментов, аппаратуры и др. Эти масла образуют на поверхности тонкую масляную пленку, защищающую поверхность от внешней среды, а также

являются смазочным материалом при переходе от консервации к эксплуатации. Консервационное масло, как правило, несовместимо с ходовым и перед запуском законсервированного устройства должно быть полностью заменено или в него добавлено ходовое масло.

Масла для технологических операций — это смазочный материал, исполняющий роль вспомогательного средства в различных технологических процессах: обработке резанием, пластической и тепловой обработке, для литейных форм, керамических изделий, для производства бетонных изделий и др.

Специальные масла — это такие виды масел, которые по своим свойствам приспособлены к выполнению особых определенных функций и практически не применяются в обычных условиях смазки. К этой группе относятся пропиточные масла и масляные растворители, масло для цепей туннельных печей, масло для герметизации скважин, масляные теплоносители и др. Специальное масло получают путем введения в минеральное или синтетическое основное масло специальных присадок.

По специфике эксплуатации различают *рабочие, консервационные и консервационно-рабочие масла*.

По условиям применения масла могут быть *летние, зимние, всесезонные*, а также *для применения в регионах с особыми климатическими условиями*, например в северных (арктических).

8.3. Пластичные смазки

Основная задача пластичных смазок — снижение коэффициента трения. Меньшее применение имеют пластичные защитные смазки, наносимые на поверхность для защиты от коррозии и для герметизации. Все пластичные смазки должны отличаться высокой прилипаемостью к смазываемой поверхности.

Основным компонентом пластичных смазок является минеральное или синтетическое масло различной вязкости. В качестве загустителя используются консистентные углеводороды, а также мыла различных металлов и жирных кислот.

Загуститель образует с маслом пространственный скелет (рис. 81), в ячейках сетки которого закреплено масло. Перемещение масла ограничено перегородками скелета. Пространственный скелет обычно построен из кристаллических агрегатов с волокнистой нитевидной или шаровидной структурой. Между молекулами в агрегатах и самими агрегатами осуществляется вандерваальсово взаимодействие. Форма агрегатов и особенно форма волокон и их размещение в пространственной структуре определяют механические свойства смазки, так, например, пластичная смазка имеет предел текучести.

Пластичные смазки не деформируются под действием силы тяжести, а под действием сдвигающих сил после преодоления предела текучести

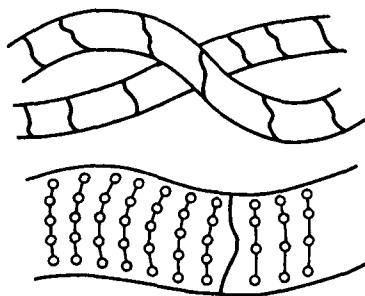


Рис. 81. Структура волокна загустителя смазок

текут как жидкости. Восстановление пространственной структуры и связанные с этим реологические свойства называются *тиксотропными свойствами*.

Свойства пластичных смазок оценивают так же, как и свойства других смазочных материалов. Дополнительно (из-за специфики их структуры) определяются *коэффициент тиксотропии, предел текучести, температура каплепадения* и др., среди которых, например, *микробиологическая стойкость*, поскольку компоненты пластичных смазок могут быть пищей для бактерий, развитие которых приводит к частичному разрушению или изменению пространственной структуры смазки.

Пластичные смазки классифицируются *по основному компоненту (маслу), виду загустителя, назначению* (для подшипников качения, скольжения, для передач; канатная смазка, уплотнительная смазка, смазка для газовых кранов, насосная и вакуумная смазка и др.) и *особым свойствам* (термостойкие, негорючие, стойкие к высокому давлению и др.).

Наибольшее распространение получили кальциевые смазки (*солидол*), изготавливающиеся из натуральных животных и растительных жиров или жирных синтетических кислот. В качестве загустителей применяется гидроксид кальция в порошковом виде (сухогашеная известь) или в виде водной взвеси (известковое молоко). Солидол выпускается разной консистенции, что определяет вязкость масла и количество загустителя.

8.4. Твердые смазочные материалы

Во многих специфических случаях в узлах трения могут применяться только *твердые смазочные материалы*. К таким случаям относятся, например, следующие условия работы узлов трения: эксплуатация ниже температур застывания масел и смазок; эксплуатация при высоких температурах, при которых смазки разлагаются и испаряются; недопустимость присутствия жидкости; невозможность периодического подвода смазочного материала к поверхностям трения и др.

Природные и искусственные твердые смазочные материалы можно разделить на две группы:

- *неорганические* — слоистые (графит, дихалькогениды переходных металлов, нитрид бора и др.); неслоистые (хлориды, фториды и иодиды металлов, оксиды и др.); мягкие металлы и их сплавы (Pb, Sn, Cd и др.);
- *органические* — полимерные материалы (политетрафторэтилен, полиимиды и др.).

Твердые смазочные материалы применяются в виде покрытий конструкционных материалов и антифрикционных наполнителей в композициях.

Основными требованиями к твердым смазочным покрытиям являются *низкое сопротивление срезу; высокая адгезия материала покрытия к подложке; возможно меньшая толщина слоя покрытия; высокое сопротивление изнашиванию; отсутствие коррозионного воздействия на металлы; высокая температурная стойкость*. Перечисленные требования существенно зависят как от природы твердого смазочного покрытия, так и от способа его нанесения на деталь.

Способы нанесения покрытий могут быть разделены по следующим группам: *механические* (натирание, галтовка и др.), *со связующим веществом* (окунание, нанесение кистью, распыление и др.), *химико-термические* и *физические* (плазменный, детонационный и др.).

8.5. Смазочно-охлаждающие жидкости

Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) — сложные многокомпонентные (в среднем 8—10 составляющих) соединения продуктов нефтехимического и химического производства. Они обладают рядом свойств, обеспечивающих при вводе их в зону резания повышение стойкости инструмента, улучшение качества обрабатываемой поверхности, уменьшение сил резания и способствующих удалению стружки.

В основе действия СОЖ на процесс резания лежат три эффекта: смазочный, охлаждающий и моющий.

Применение СОЖ не всегда дает положительный результат. Так, химически активные вещества при резании быстрорежущим инструментом во многих случаях понижают стойкость инструмента вследствие увеличения абразивно-химического износа, а также уменьшения защитного действия нароста на контактных поверхностях. Особенно значительно проявление отрицательного влияния СОЖ на стойкость при малых скоростях резания.

В промышленности применяются два основных вида СОЖ: *масляные* и *водорастворимые*.

Масляные СОЖ состоят из минерального масла (60...95%) и различных присадок: антифрикционных, антизадирных, антипенных и анти-туманных ингибиторов коррозии. Масляные СОЖ (сульфофрезол, МР-1, ОСМ-3) обладают наиболее высоким смазочным действием и применяются в основном при обработке быстрорежущим инструментом на низкой скорости резания и при необходимости снизить шероховатость обработанной поверхности.

Водорастворимые СОЖ (*эмульсолы*) содержат 70...85% минерального масла и 30...15% эмульгаторов вместе с различными присадками. Из эмульсолов (Э-1...3, ЭТ-2 и др.) приготавливают водные эмульсии (обычно 1...10% эмульсола). Водные охлаждающие эмульсии благодаря смазочному и высокому охлаждающему действию получили наиболее широкое применение.

ГЛОССАРИЙ

А

абразив — 347
абсорбция — 110
авиаль — 217
автоклав — 295
агломерация 281
агрегаты камнеподобные — 11
агрегаты разрыхленные — 11
адгезия — 18
адсорбция — 110
азотирование — 140
азотирование стали — 153
акмигран — 328
алитирование — 140
аллотропия — 22
алмаз — 19
алнико — 183
алоры — 370
алюминий — 212
анизотропия — 11
анодирование — 221
антипирины — 243
антисептики — 224
антиферромагнетик — 98
антифрикционность — 221, 400
арболит — 314
арматура стальная — 316, 317
армирование — 70
армко-железо — 146
асбестоцемент — 334
асбоволокниты — 333
атмосферостойкость — 115
аустенит — 147

Б

баббиты — 221
бензин — 397
бетон — 296
бетоны асфальтовые — 246
бетоны легкие — 300
бетоны силикатные — 323
бетоны тяжелые — 302
бетоны тяжелые специального назначения — 305
бетоны ячеистые — 312
биметалл — 210
битумы — 262
блок кристаллита — 33
боразан — 346
борирование — 140
бороволокниты — 373
бревна — 244
бризол — 333

бронзы — 205

бронзографит — 227

брус — 246

брусок — 246

брусчатка — 274

бумага (фильтровальная, реактивная) — 252, 253

В

вакансия — 32
вата минеральная — 328
вермикулит вспученный — 281
вещества аморфные — 12
вещества вулканизирующие — 258
вещества вяжущие — 261
вещества вяжущие минеральные автоклавного
твердения — 295
вещества вяжущие неорганические минераль-
ные — 262, 282
вещества вяжущие органические — 261
вещества кристаллические — 11
вещества особо чистые — 121
вещество — 4
вещество органическое — 4
вещество твердое — 11
взаимодействие вандерваальсово — 16
винипласт — 65
водопоглощение — 76
водопроницаемость — 76
водостойкость — 116
возврат металлов — 130
воздухопроницаемость — 76
волокно базальтовое — 329
волочение — 123
вольфрам — 200
воронение — 221
ворсолан — 377
ворсонит — 377
восприимчивость магнитная — 100
вулканизация — 257
выносливость — 119
вязкость — 80, 132
вязкость ударная — 86, 132

Г

газ — 15
газоасфальт — 265
газобетон — 312
газопроницаемость — 76
гель — 14
генезис — 10
германий — 379
герметики — 385

гетинакс — 368
гигроскопичность — 76
гидротация цемента — 282
гидроизол — 334
гидростеклоизол — 356
гидрофильность — 76
гидрофобизация — 269
гидрофобность — 76
гипсобетон — 312
гистерезис — 101
глазурь — 339
гниение древесины — 244
гомогенизация — 220
гонт — 248
горбыль — 246
гравий — 275
гравий керамзитовый — 281
графит — 19, 329
графитизация — 186
грунтовки — 390, 396

Д

двойник — 35
двойникование — 83
дегтебетон — 266
дегти — 263
дендриты — 222
дерево — 241
деструкция полимера — 105
дефекты кристаллической решетки — 32
дефект Френкеля — 33
дефект Шоттки — 33
деформация — 81
деформируемость — 118
диаграмма деформации — 87
диаграмма состояния — 49
диамагнетизм — 99
диамагнетик — 99
дислокация — 33
диспергирование — 11
дисперсность — 12
диффузия — 108
диэлектрики — 91
долговечность — 115
домен — 97
доски — 246
дрань — 248
древесина — 242
древесина деловая — 244
дуралюмины — 217
дырка — 91

Ж

жаропрочность — 120
жаростойкость — 116
железо — 145
железобетон — 316

железографит — 227
железо техническое — 144
жесткость — 180
жердь — 245
жесть — 167
живучесть — 119
жидкость — 37
жидкости кремнийорганические — 69
жидкости нормальные — 14
жидкости смазочно-охлаждающие — 404

З

закалка — 133
закалка стали — 156
закаливаемость стали — 156
закон аддитивности — 121
заполнители пористые — 279
затвердевание — 26
звукоизоляция — 78
звукопоглощение — 78
звукопроницаемость — 78
золь — 14
зоны Гинье—Престона — 217

И

известь воздушная — 285
известь гидравлическая — 289
изделие — 4
изделия древесные — 248
изделия каменные искусственные — 295
излом — 85
изнашивание — 106
износ — 106
износостойкость — 108
изол — 333
инвар — 182
ингибиторы — 382
индицирование — 30
индукция магнитная — 100
интерметаллиды — 40
испарение — 25
стираемость — 120

К

кальций — 223
камбий — 241
камень бутовый — 275
камень облицовочный — 271
камень цементный — 282
камнеобработка — 268
камни бортовые — 273
камни природные строительные — 270, 274
камни стеновые — 271
конода — 54
карбин — 19
карболокниты — 371
картон бумажный — 254, 255

картон асбестовый — 333
 каучук — 62
 каучук натуральный — 62
 каучуки бутадиеновые — 62
 каучуки бутадиен-нитрильные — 62
 каучуки бутадиен-стирольные — 63
 каучуки винилпиридиновые — 63
 каучуки жидкие — 64
 каучуки изопреновые — 63
 каучуки карбоксилатные — 63
 каучуки кремнийорганические — 63
 каучуки синтетические — 62
 каучуки полисульфидные — 63
 каучуки хлоропреновые — 64
 каучуки этиленпропиленовые — 64
 качество материала — 5
 керамзит — 345
 керамика — 337
 керметы — 339
 керосин — 397
 кирпич дорожный — 345
 кирпич керамический — 341
 кирпич силикатный — 321, 322
 кластер — 19
 клеи — 383
 клинкер — 283
 коагуляция — 135
 ковар — 182
 ковка — 123
 ковкость — 113
 когезия — 18
 когерентность — 28
 кольца годичные — 242
 компаунды — 387
 компонент — 11
 конденсация — 25
 конода — 54
 константан — 211
 контракция — 283
 копель — 211
 кора растения — 241
 корд —
 коробление стали — 158
 коррозия — 110
 корунд — 345
 коэффициент температурный линейного расширения — 78
 коэффициент температурный удельного электросопротивления — 91
 коэффициент Пуассона — 88
 коэффициент размягчения — 116
 краски — 392
 красностойкость — 117
 кремний — 379
 кривые намагничивания — 101
 кривые термомеханические — 136
 кристаллизация — 26

кристаллизация вторичная — 26
 кристаллизация первичная — 26
 кристаллы — 11
 кристаллы жидкие — 14
 кристаллы ионные — 17
 кристаллы ковалентные — 17
 кристаллы молекулярные — 17
 кроны — 352
 куниаль — 211

Л

лаки — 395
 латекс — 62
 латуни — 203
 легирование — 36
 ледебурит — 148
 лента изоляционная липкая — 376
 лесоматериалы — 244
 лесоматериалы круглые — 244
 ликвация — 45
 ликвидус — 51
 линкруст — 254
 линолиум — 376
 лонсдейлит — 20
 луб — 241
 лужение — 222

М

магналии — 215
 магнетизм — 97
 магний — 218
 магнитодиэлектрики — 103
 магнитострикция — 99
 макромолекула — 56
 макроструктура — 41
 манганин — 211
 марблит — 354
 мартенсит — 28
 мартенсит стали — 154
 масла смазочные — 400
 масса молекулярная — 74
 масса вещества — 74
 мастика — 266
 материал — 4
 материаловедение — 4
 материалы абразивные — 347
 материалы асбестовые — 331
 материалы бумажные — 251
 материалы вспомогательные — 4
 материалы графитовые — 329
 материалы древесные — 247
 материалы дорожные каменные — 273
 материалы искусственные — 10
 материалы каменные плавленные — 327
 материалы каменные природные — 268
 материалы ковровые синтетические — 377
 материалы композиционные — 69

материалы композиционные с металлической матрицей — 232
материалы лакокрасочные — 387
материалы магнитно-жесткие — то же, что *магнитно-твердые материалы*
материалы магнитно-мягкие — 103
материалы магнитно-твердые — 104
материалы магнитные — 102
материалы металлические порошковые — 225
материалы немагнитные — 102
материалы основные — 4
материалы пленкообразующие — 381
материалы полимерные пластические — 361
материалы полупроводниковые — 378
материалы природные — 10
материалы силикатные — 320
материалы слоистые — 71
материалы слюдяные — 336
материалы слюденитовые — 336, 337
материалы смазочные — 339
материалы фрикционные — 228
материалы шлифовальные — 348
медь — 201
мельхиор — 211
металлизация — 239
металлокерамика — см. *материалы металлические порошковые*
металлокомпозиты — см. *материалы композиционные с металлической матрицей* — 232
металлопласт — 239
металлы — 17
металлы тугоплавкие — 198
металлы цветные — 145
металлы черные — 144
метизы — 167
миканиты — 335, 336
микафалит — 335
микроскопия оптическая — 43
микроскопия растровая электронная — 44
микроскопия электронная — 44
микроструктура — 42
минералокерамика — 339
мипора — 254
модификация полиморфная — 22
модифицирование — 27
модифицирование древесины — 244
модифицирование металлов — 189
модули упругости — 88
модуль гидравлический — 289
модуль сдвига — 88
модуль Юнга — 87
молекула — 56
молибден — 199
молибденирование — 200
момент магнитный — 97
монокристалл — 11

мономер — 58
морозостойкость — 117

Н

надежность — 115
наирит — 64
наклеп — 84
намагниченность — 97
намагничивание — 98
направления кристаллографические —
напряжение механическое — 84
нейзильбер — 211
ниобий — 198
нитрид бора — 339
нитроцементация — 140
нитроцементация стали — 160
нихром — 183
нормализация — 132
нормализация стали — 156

О

обжиг — 285
обои — 253
обрабатываемость — 113
обработка давлением — 123
обработка материалов — 120
обработка механическая — 122
обработка резанием — 123
обработка термическая — 129
обработка термическая стали — 154
обработка термомагнитная — 130
обработка термомеханическая — 136
обработка термомеханическая стали — 158
обработка химико-термическая — 138
обработка химико-термическая стали — 159
обработка электротермическая — 130
огнестойкость — 116
огнеупорность — 117
огнеупоры — 117
оксидирование — 221
олигомер — 60
олово — 222
органоволокниты — 371
отдых металлов — 130
отжиг — 130
отжиг графитизирующий — 190
отжиг стали — 155
отжиг рекристаллизационный — 132
отношение водоцементное — 303
отпуск — 135
отпуск стали — 157
отражение — 75

П

пайка — 224
парамагнетизм — 99
парамагнетик — 97

параметры элементарной ячейки — 30
 парообразование — 25
 паропроницаемость — 76
 пассивирование — 221
 пасты — 14
 пасты нефтяные — 267
 пати́на — 201
 пек — 261
 пенобетон — 312
 пенопласты — 375
 пеностекло — 356
 пеношлакоситаллы — 360
 пены — 14
 пергамент — 253
 пергамин — 256
 переохладение — 26
 перитектика — 48
 перитектоид — 48
 перлит (в металловедении) — 148
 перлит впусченный — 281
 пермаллои — 184
 петроситаллы — 359
 песок — 277
 песок аглопоритовый — 280
 песок керамзитовый — 281
 пигменты — 387
 пиломатериалы — 246
 пирографит — 331
 пироуглерод — 20
 пироэлектрики — 93
 плавление — 26
 плазма — 15
 плакирование — 217
 пластики бумажно-слоистые декоративные — 366
 пластики древесно-слоистые — 368
 пластикат — 65
 пластификаторы пластмасс — 366
 пластичность — 80
 пластмассы — 361
 пленки декоративно-отделочные — 376
 плитки керамическая — 342
 плитки стеклянная эмалированная — 354
 плиты древесностружечные (древесноволокнистые) — 249, 250
 плиты тротуарные — 274
 плоскость кристаллографическая — 30
 плотность — 75
 поглощение потока излучения — 76
 подтоварник — 244
 покрытия защитные — 112
 ползучесть — 118
 полигонизация — 131
 полиакрилаты — 67
 полиамиды — 68
 поливинилацетат — 65
 поливинилхлорид — 65
 полиизобутилен — 65
 поликонденсация — 61
 поликристаллы — 11
 полимербетон — 315
 полимеризация — 61
 полимер — 56
 полимеры аминокальдегидные — 68
 полимеры кремнийорганические — 69
 полимеры фенолальдегидные — 67
 полимеры фурановые — 68
 полимеры эпоксидные — 68
 полиметилметакрилат — 67
 полиморфизм — 22
 полипропилен — 65
 полистирол — 65
 полиуретан — 67
 полиформальдегид — 68
 полиэтилен — 64
 полупроводники — 91
 полупроводники аморфные — 380
 полупроводники органические — 380
 полуфарфор — 339
 поляризация диэлектриков — 92
 пористость — 41
 порог хладноломкости — 90
 пороки древесины — 242
 поропласты — 375
 порошки асбестовые — 333
 портландцемент — 290
 поры — 41
 порядок ближний — 20
 порядок дальний — 20
 порядок ориентационный — 21
 потери диэлектрические — 94
 правило отрезков — 54
 правило фаз Гиббса — 50
 превращения полиморфные — 22
 превращение мартенситное — 28
 превращение фазовое — 23
 превращение фазовое второго рода — 23
 превращения фазовые первого рода — 23
 предел выносливости — 119
 предел пропорциональности — 88
 предел прочности — 89
 предел текучести — 89
 предел упругости — 88
 прессование — 123
 припой — 224
 пробой электрический — 94
 проводники электрические — 91
 производство метизное — 167
 производство прокатное — 166
 производство трубное — 167
 прокаливаемость стали — 156
 прокат — 166
 прокатка — 123
 проницаемость — 75

проницаемость диэлектрическая — 93
проницаемость магнитная — 100
профиль металлический — 166
процесс равновесный — 25
прочность длительная — 119
прочность механическая — 80
прочность электрическая — 94
пустотность — 42
пустоты — 42
пьезокерамика — 338
пьезоэлектрики — 93

Р

равновесие термодинамическое — 24
равновесие фазовое — 49
разрушение — 85
расплав — 37
раствор истинный — 13
раствор коллоидный — 14
раствор строительный — 264, 326
раствор твердый — 37
растворимость — 13
растворитель — 13, 382, 390
растворители для лакокрасочных материалов — 397
растворы асфальтовые — 264
растворы строительные — 264
расширение тепловое — 78
реактопласты — 363
регенерат — 258
резина — 256
рекристаллизация — 131
релаксация — 24
релаксация напряжений — 118
решетка Бравэ — 31
решетка кристаллическая — 30
романцемент — 294
рубероид — 255

С

самодиффузия — 108
свариваемость — 114
сверхструктура — 38
сверхпроводимость — 91
светостойкость — 115
свинец — 223
свойства магнитные — 99
свойства механические — 79
свойства технологические — 113
свойства потребительские — 114
свойства физические — 72
свойства электрические — 90
свойства материала — 4
связь водородная — 16
связь ионная — 16
связь ковалентная — 16
связь металлическая — 16

связь молекулярная — 16
связь химическая — 15
сегнетоэлектрики — 93
сердцевина дерева — 241
сила коэрцитивная — 101
силицирование — 140
силумин — 216
сингония кристаллов — 31
синтез химический — 61
система гетерогенная — 25
система гомогенная — 24
система термодинамическая — 24
системы дисперсные — 13
системы коллоидные — 14
ситаллы — 358
ситаллопласты — 359
склеивание — 381
смазки пластичные — 402
смазки твердые — 403
смальта — 354
смесь бетонная — 296
смола — 60
соединение химическое — 39
солидус — 51
сополимеры — 58
сопротивление электрическое удельное — 90
сорбит — 154
сорбция — 110
состав материала — 4
составляющая структурная — 47
состояние агрегатное вещества — 10
состояние газообразное — 15
состояние жидкое вещества — 13
состояние стеклообразное вещества — 12
состояние метастабильное — 24
сотопласты — 254
сохраняемость — 120
спекание — 225
сплавы антифрикционные (алюминиевые) — 218
сплавы металлические — 36
сплавы железоуглеродистые — 146
сплавы медно-никелевые — 210
сплавы прецизионные — 181
сплавы твердые — 178
стали инструментальные — 178
стали конструкционные — 170
стали парамагнитные — 185
стали с особыми физическими свойствами — 181
сталь — 150
старение — 104
старение искусственное — 135
старение стали — 185
стекла металлические — 235
стекло армированное — 357
стеклоблоки — 355

стекловата — 355
 стекловолок — 356
 стекловолокно — 355
 стекло жидкое — 288
 стекломаты — 356
 стекло неорганическое — 348
 стеклопор — 357
 стекло органическое — 374
 стеклопакеты — 355
 стеклопластики — 369
 стеклопрофилит — 355
 стеклорубероид — 356
 стеклотекстолит — 369
 стеклоуглерод — 20
 стемалит — 354
 стойкость коррозионная — 111
 стойкость радиационная — 116
 стойкость химическая — 115
 строение аморфное веществ — 12
 строение гетеродесмическое — 18
 строение кристаллическое веществ — 11
 строение материала — 4
 стружка древесная — 248
 структура видманштеттовая — 28
 структура материала — 4
 структура надмолекулярная — 59
 структура тонкая — см. *субструктура* — 43
 субзерно — 43
 субструктура — 43
 суспензия — 14
 сшивание полимера — 105
 сырье — 4

Т

твердость — 81
 твердость по Моосу — 330
 текстолиты — 368
 текстура деформации — 125
 текстура магнитная — 126
 текучесть — 98
 температура — 73
 температура возгорания — 74
 температура воспламенения — 74
 температура кипения — 74
 температура плавления — 74
 температура разложения — 74
 температура размягчения —
 температура стеклования — 74
 теплопроводность — 77
 теплостойкость — 117
 термодинамика — 24
 термозит — 281
 термопан — 352
 термопласты — 58
 термостойкость — 117
 терракота — 339
 тесто цементное — 282

тикол — 63
 титан — 194
 тиурам — 258
 толь — 256
 томпак — 204
 точка критическая верхняя (нижняя) — 149
 точка Кюри — 98
 точка сингулярная — 39
 трансляция — 30
 трекинг — 95
 трение внешнее — 106
 трение внутреннее — 80
 трещина зародышевая — 85
 трещиноватость — 42
 трибология — 106
 триплекс — 352
 троостит — 154

У

уайт-спирт — 397
 углерод — 19
 узлы кристаллической решетки — 30
 улучшение стали — 159, 161, 162
 упрочнение деформационное — 84
 упругость — 80
 усталость — 119
 усталость коррозионная — 119

Ф

фаза — 22
 фазы внедрения — 40
 фанера — 248
 фарфор — 339
 фаянс — 339
 ферримagnetик — 97
 феррит — 147
 ферриты — 103
 ферромагнетик — 97
 ферронихром — 183
 фехраль — 182
 фибра — 367
 фибробетон — 319
 фибролит — 251
 фибры — 71
 флинты — 352
 флокены — 153
 фольгоизол — 218
 фольгорубероид — 218
 фосфатирование — 239
 фотоэффект — 92
 фрактография — 42
 фреттинг-коррозия — 107
 фторкаучуки — 64
 фторопласты — 65
 фуллерен — 19

Х

хладноломкость — 85
хладостойкость — 117
хром — 200
хромель — 182
хромирование — 140
хрупкость — 80

Ц

целлюлоза — 242
цемент — 282
цемент ангидритовый — 288
цементация — 140
цементация стали — 159
цемент глиноземистый — 293
цементит — 148
цент кристаллизации — 26
цианирование — см. *нитроцементация*
цинк — 223
цинкование — 160

Ч

черепица керамическая — 343
чугун — 186

Ш

шерсть древесная — 248
шкала Мооса — 330
шлакобетон — 310

шлакопортландцемент — 292
шлакоситалты — 360
шпатлевки — 396
шпон — 248
штамповка — 123

Щ

щебень — 276

Э

эбонит — 258
эвтектика — 48
эвтектоид — 48
эластичность — 80
электрокорунд — 346
электроны проводимости — 91
электропроводность — 90
электросопротивление — 90
эльбор — 346
эмали — 392
эмульсии — 394
эмульсии нефтяные — 394
эпитаксия — 379
эстрих-гипс — 288
этtringит — 283

Я

явления капиллярные — 76
ячейка элементарная — 30

ЛИТЕРАТУРА

1. Бозорт Р. Ферромагнетизм. — М.: Ин. лит., 1956.
2. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение. — М.: Атомиздат, 1975.
3. Винников В.А., Давиденко Б.Ю., Каркашадзе Г.Г. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Физика горных пород». — М.: МГИ, 1990. С. 55—62, 63—69.
4. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи. — М.: Metallurgia, 1983. С. 118—139.
5. Жуковец И.И. Механические испытания металлов. — М.: Высшая школа, 1980.
6. Зильбершмидт М.Г., Заворыкина Т.К. Методы анализа структурного состояния горных пород. Ч. 1. — М.: МГИ, 1989. С. 17—36.
7. Золотаревская В.С. Механические свойства металлов. — М.: Metallurgia, 1983.
8. Испытания материалов: Пер. с нем. / Под ред. Х. Блюменауэра. — М.: Metallurgia, 1979. С. 26—55.
9. Ковба Л.М., Трунов В.К. Рентгенофазовый анализ. 2-е изд. — М.: Изд-во МГУ, 1976.
10. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. — М.: МГУ, 1976.
11. Кухлинг Х. Справочник по физике. — М.: Мир, 1985.
12. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. 3-е изд. — М.: Машиностроение, 1990. С. 7—17, 48—65, 87—170.
13. Липсон Г., Стилл Г. Интерпретация порошковых рентгенограмм / Под ред. Н.В. Белова. — М.: Мир, 1972. С. 11—210.
14. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. 2-е изд. — М.: Недра, 1990. С. 104—119.
15. Методы минералогических исследований: Справочник / Под. ред. А.И. Гинзбурга. — М.: Недра, 1985. С. 85—93, 345—348.
16. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. — М.: Высшая школа, 1981.
17. Михеев В.И. Рентгенометрический определитель минералов. — М.: Госгелтехиздат, 1957.
18. Недома И. Расшифровка рентгенограмм порошков. — М.: Metallurgia, 1975.
19. Ормонт Б.Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников: Учебное пособие для втузов. — М.: Высшая школа, 1973. С. 131—142.
20. Практикум по грунтоведению / Под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. — М.: Изд-во МГУ, 1993. С. 45—51, 168—183.
21. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. — М.: Недра, 1984. С. 76—77, 94—95.
22. Руководство по рентгеновскому исследованию минералов / Под ред. В.А. Франк-Каменецкого. — Л.: Недра, 1975. С. 7—98, 134—178, 240.

23. Техническое описание и инструкция по эксплуатации маятникового копра 2083 КМ-04. — М.: СКБ ПО «Точприбор», 1981.

24. Ультразвуковой прибор УКБ-1М. Техническое описание и инструкция по применению.

25. Физическое металловедение / Под ред. Р. Кана. Вып. 2. Фазовые превращения. Металлография. — М.: Мир, 1968. С. 422—424.

26. Физическое металловедение / Под ред. Р. Кана. Вып. 3. Дефекты кристаллического строения. Механические свойства металлов и сплавов. — М.: Мир, 1968. С. 422—423.

27. Физические методы исследования металлов. — М.: Машиностроение, 1971.

28. Худокормова Р.Н., Фунштейн Я.Н., Рицев И.А. Металловедение и термическая обработка металлов (лабораторные работы) / Под ред. Л.С. Ляховича. — Минск: Высшая школа, 1976. С. 30—55, 74—84.

29. Шлугер М.А., Ажогин Ф.Ф., Ефимов Е.А. Коррозия и защита металлов. — М.: Металлургия, 1981.

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Предисловие</i>	3
<i>Введение</i>	4
1. Основные понятия	4
2. Значение, цели и задачи дисциплины «Материаловедение» для подготовки бакалавров в области горного дела. Взаимосвязь с другими дисциплинами	4
3. Общие требования, предъявляемые к материалам в зависимости от условий использования или эксплуатации	5
4. Системный подход к изучению строения, структуры и свойств материалов	8

Глава 1

Основные понятия о строении, структуре и свойствах материалов

1.1. Агрегатные состояния вещества	10
1.1.1. Общие сведения	10
1.1.2. Строение однородных веществ в различных агрегатных состояниях	15
1.1.2.1. Взаимодействие структурных частиц вещества	15
1.1.2.2. Самоорганизация структурных частиц вещества	18
1.1.3. Фазы и фазовые превращения	22
1.1.4. Характеристика основных фазовых превращений	25
1.1.4.1. Фазовое превращение: газообразное состояние — жидкое состояние	25
1.1.4.2. Фазовое превращение: жидкое состояние — твердое состояние	25
1.2. Строение кристаллических веществ на атомной (ионной) основе	29
1.2.1. Кристаллическая решетка	29
1.2.2. Дефекты кристаллической решетки	32
1.3. Металлические сплавы	36
1.3.1. Общие сведения	36
1.3.2. Характеристика фаз, образующих сплавы	37
1.3.3. Структура сплавов	41
1.3.4. Фазовые и структурные превращения в сплавах	45
1.3.5. Диаграммы состояния сплавов	49
1.4. Полимерные вещества	56

1.4.1. Состав, строение и структура полимерных сплавов	56
1.4.2. Понятия о классификациях полимерных материалов	60
1.4.3. Общая характеристика каучуков	62
1.4.4. Общая характеристика высокомолекулярных полимеров	64
1.4.4.1. Термопластичные полимеры	64
1.4.4.2. Термореактивные полимеры	67
1.5. Композиционные материалы	69
1.6. Физические свойства	72
1.6.1. Физические величины, характеризующие агрегатное состояние вещества	73
1.6.2. Физические свойства, характеризующие способность веществ и материалов взаимодействовать с потоками масс и излучений	75
1.6.3. Механические свойства	79
1.6.3.1. Общие сведения	79
1.6.3.2. Деформации и напряжения	81
1.6.3.3. Разрушение кристаллических веществ	85
1.6.3.4. Основные механические характеристики	87
1.6.4. Электрические свойства	90
1.6.5. Магнитные свойства	97
1.7. Свойства веществ и материалов в основных физико-химических процессах	104
1.7.1. Старение	104
1.7.2. Изнашивание	106
1.7.3. Диффузия	108
1.7.4. Коррозия	110
1.8. Технологические свойства	113
1.9. Потребительские свойства	114
1.10. Способы воздействия на свойства веществ и материалов	120
1.10.1. Взаимосвязь химического состава со свойствами веществ и материалов	120
1.10.2. Механическая обработка	122
1.10.2.1. Общие сведения	122
1.10.2.2. Деформация поликристаллов	123
1.10.2.3. Деформация полимеров	127
1.10.2.4. Деформация аморфных сплавов	128
1.10.3. Термическая обработка	129
1.10.3.1. Отжиг	130
1.10.3.2. Закалка	133
1.10.3.3. Отпуск и искусственное старение	134
1.10.4. Термомеханическая обработка	136
1.10.5. Химико-термическая обработка	138

1.11. Общие требования безопасности при использовании или применении веществ и материалов	140

Глава 2

Металлы и сплавы

2.1. Железо и сплавы на его основе	144
2.1.1. Система «железо — цементит»	146
2.1.2. Стали и сплавы	150
2.1.2.1. Структура сталей в равновесном состоянии	150
2.1.2.2. Влияние углерода и постоянных (технологических) примесей на свойства сталей и сплавов	151
2.1.2.3. Влияние термической, термомеханической и химико-термической обработок на свойства сталей и сплавов	154
2.1.2.4. Влияние легирующих элементов на свойства сталей и сплавов	160
2.1.2.5. Общая классификация сталей	163
2.1.2.6. Маркировка сталей по химическому составу	165
2.1.2.7. Конструкционные стали и сплавы	170
2.1.2.8. Инструментальные стали и сплавы	178
2.1.2.9. Стали и сплавы с особыми физическими свойствами	181
2.1.2.10. Старение углеродистой стали	185
2.1.3. Чугуны	186
2.1.3.1. Общие сведения	186
2.1.3.2. Белые чугуны	188
2.1.3.3. Серые чугуны	189
2.1.3.4. Ковкие чугуны	190
2.1.3.5. Высокопрочные чугуны	192
2.1.3.6. Чугуны специального назначения	193
2.2. Титан и сплавы на его основе	194
2.3. Тугоплавкие металлы и сплавы на их основе	198
2.4. Цветные металлы и сплавы на их основе	201
2.4.1. Медь и сплавы на ее основе	201
2.4.1.1. Медь	201
2.4.1.2. Латунь	203
2.4.1.3. Бронзы	205
2.4.1.4. Медно-никелевые сплавы	210
2.4.2. Алюминий и сплавы на его основе	212
2.4.3. Магний и сплавы на его основе	218
2.4.4. Антифрикционные (подшипниковые) сплавы на оловянной, свинцовой и цинковой основах	221

2.4.5. Припои	224
2.5. Порошковые металлические материалы	225
2.5.1. Конструкционные металлические порошковые материалы	227
2.5.2. Инструментальные металлические порошковые материалы	229
2.5.3. Порошковые металлические материалы специального назначения с особыми свойствами	230
2.6. Композиционные материалы с металлической матрицей	232
2.6.1. Композиционные дисперсно-упрочненные материалы с металлической матрицей	233
2.6.2. Композиционные материалы с металлической матрицей и волокнистым упрочнителем	234
2.7. Металлические стекла	235
2.8. Защита металлов от коррозии	238

Глава 3

Материалы из органических веществ

3.1. Лесоматериалы	241
3.1.1. Общие сведения	241
3.1.2. Круглые лесоматериалы	244
3.1.3. Пиломатериалы	246
3.1.4. Древесные материалы и изделия из них	247
3.2. Бумажные материалы	251
3.2.1. Общие сведения	251
3.2.2. Бумага и изделия на ее основе	252
3.2.3. Картон и изделия на его основе	254
3.3. Резиновые материалы	256
3.3.1. Общие сведения	256
3.3.2. Состав резиновых материалов	258
3.3.3. Классификация резиновых материалов по назначению и области применения	259
3.4. Органические вяжущие вещества и материалы на их основе	261
3.4.1. Битумные и дегтевые вещества	261
3.4.2. Асфальтовые строительные растворы и бетоны	264
3.4.3. Мастики кровельные и гидроизоляционные	266
3.4.4. Нефтяные эмульсии и пасты	267

Глава 4

Материалы из неорганических минеральных веществ

4.1. Разрыхленные, дисперсные и каменные материалы	268
4.1.1. Каменные природные материалы	268
4.1.1.1. Общие сведения	268
4.1.1.2. Природные строительные камни	270
4.1.1.3. Грубо обработанные каменные материалы	275
4.1.2. Минеральные неорганические вяжущие вещества и материалы на их основе	282
4.1.2.1. Воздушные минеральные неорганические вяжущие вещества	284
4.1.2.2. Гидравлические минеральные неорганические вяжущие вещества	288
4.1.2.3. Минеральные вяжущие вещества автоклавного твердения	295
4.1.2.4. Искусственные каменные изделия на основе минеральных неорганических вяжущих веществ	295
4.1.3. Искусственные каменные материалы	296
4.1.3.1. Бетоны	296
4.1.3.2. Силикатные материалы и изделия автоклавного твердения	320
4.1.3.3. Строительные растворы	326
4.2. Каменные плавленные материалы (каменное литье)	327
4.3. Неорганические полимерные материалы	329
4.3.1. Графитовые материалы	329
4.3.2. Асбестовые материалы и изделия	331
4.3.2.1. Асбестовые материалы	331
4.3.2.2. Асбестоцементные изделия	334
4.3.3. Слодяные материалы	335
4.3.4. Керамические материалы	337
4.3.4.1. Общие сведения	337
4.3.4.2. Конструкционная керамика	340
4.3.4.3. Инструментальная керамика	345
4.3.4.4. Техническая керамика	346
4.3.5. Неорганическое стекло	348
4.3.5.1. Общие сведения	348
4.3.5.2. Классификация стекол по назначению и области применения	351
4.3.5.3. Материалы и изделия из стекла	355
4.3.6. Ситаллы	358

Глава 5
Полимерные пластические материалы

5.1. Общие сведения	361
5.2. Состав пластических материалов	365
5.3. Характеристики некоторых пластмасс и изделий на их основе	366
5.3.1. Пластмассы с листовым наполнителем	366
5.3.2. Пластмассы с волокнистым наполнителем	371
5.3.3. Пластмассы без наполнителя	374
5.3.4. Пластмассы с газовоздушным наполнителем	374
5.3.5. Стандартизированные изделия из пластмасс	376

Глава 6
Полупроводниковые материалы

Глава 7
Пленкообразующие материалы

7.1. Общие сведения	381
7.2. Клеящие материалы	381
7.3. Герметики	385
7.4. Лакокрасочные защитные материалы	387
7.4.1. Общие сведения	387
7.4.2. Характеристика основных видов лакокрасочных материалов	392
7.4.2.1. Краски	392
7.4.2.2. Лаки	395
7.4.2.3. Грунтовки	396
7.4.2.4. Шпатлевка	396
7.4.2.5. Растворители для лакокрасочных материалов	397

Глава 8
Смазочные материалы

8.1. Общие сведения	399
8.2. Смазочные масла	400
8.3. Пластичные смазки	402
8.4. Твердые смазочные материалы	403
8.5. Смазочно-охлаждающие жидкости	404
Глоссарий	406
Литература	414
	421

Учебное издание

Ржевская Светлана Владимировна

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебник

Редактор *Е.В. Комарова*

Оформление *Т.Ю. Хрычевой*

Корректор *ЕЛ.В. Яковлева*

Компьютерная верстка *Ю.В. Одинцовой*

Подписано в печать 22.04.2004. № 17(и). Формат 70х100/16

Печать офсетная. Бумага офсетная

Печ. л. 26,5. Тираж 3000 экз. Заказ № 3647

Издательско-книготорговый дом «Логос»

105318, Москва, Измайловское ш., 4

По вопросам приобретения литературы
обращаться по адресу:

105318, Москва, Измайловское ш., 4.

Тел./факс: (095) 369-5819, 369-5668, 369-7727

Электронная почта: universitas@mail.ru

Дополнительная информация на сайте:

<http://logosbook.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов во ФГУП ИПК

«Ульяновский Дом печати». 432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14