

Высшее профессиональное образование

БАКАЛАВРИАТ

С. П. ПОЖИДАЕВА

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебник

*Для студентов учреждений
высшего профессионального образования,
обучающихся по направлению подготовки
«Педагогическое образование»
(профиль «технология»)*



Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 620.22(075.8)
ББК 30.3я73
П466

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф., директор Стерлитамакского филиала Уфимского государственного авиационного технического университета *А. Л. Галиев*;
д-р пед. наук, проф., декан факультета технологического и художественного образования Бирской государственной социально-педагогической академии *Р. З. Тагариев*

Пожидаева С.П.

П466 **Материаловедение** : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / С.П.Пожидаева. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 352 с. — (Сер. Бакалавриат).
ISBN 978-5-7695-9576-9

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки 050100 «Педагогическое образование» (профиль «технология», квалификация «бакалавр»).

Изложены сведения о строении, свойствах и способах получения основных видов конструкционных материалов. Рассмотрены методы изменения их свойств в нужном направлении, а также области применения. Приведенные справочные данные об основных свойствах материалов позволят использовать учебник при выполнении ряда практических заданий.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 620.22(075.8)
ББК 30.3я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым
способом без согласия правообладателя запрещается*

© Пожидаева С.П., 2013
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2013
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2013

ISBN 978-5-7695-9576-9

Материаловедением называется прикладная наука о связи состава, строения и свойств материалов. Решение важнейших технических проблем, связанных с экономией материалов, уменьшением массы машин и приборов, повышением прочности, надежности и работоспособности механизмов и приборов, во многом зависит от развития материаловедения. Развитию техники в настоящее время способствуют все области естественных наук. Непрерывный процесс создания новых материалов для современной техники обогащает науку о материалах, которая стимулирует появление новых технических идей.

Использование ранее неизвестных сведений для создания и совершенствования способов производства (технологий) является общественной необходимостью, так как позволяет успешнее решать задачи повышения эффективности производства и ускорения социально-экономического развития страны. Решение этих задач возможно за счет улучшения качества и ассортимента металлопродукции; увеличения производства новых конструкционных материалов, покрытий и изделий на основе металлических порошков; развития производства новых полимерных и композиционных материалов с комплексом требуемых свойств; широкого применения малоотходных, безотходных и малооперационных технологических процессов; использования высокоэффективных методов обработки металлов и материалов, обеспечивающих существенное улучшение их свойств, а также осуществления ряда других мероприятий.

Революционную роль в развитии материаловедения как науки сыграли полупроводниковые материалы и жидкие кристаллы в электронике, композиционные материалы в авиации и ракетостроении, сверхпроводники и аморфные сплавы в электронике и радиотехнике. Большие перспективы в развитии технологий будущего открывает освоение веществ, создаваемых на основе новых модификаций углерода — фуллеренов (C_{2K}). Исследование свойств этих веществ показало, что они могут служить основой для производства уникальных смазочных материалов в машиностроении, генной инженерии, микроэлектронике, которая в своей миниатюризации дошла до своего естественного предела — атомно-молекулярных размеров.

Для новой технологии и термин необходимо использовать другой — «нанoeлектроника», поскольку характерные размеры ее элементов в случае использования нового материала будут порядка 10^{-12} м. Легирование фуллерита, например кадмием, превращает его в сверхпроводник, хотя чистый фуллерит — диэлектрик. Меняя технологии по-

лучения материала, можно получать вещества с совершенно новыми, уникальными, свойствами, которые, как показывают проводимые в настоящее время исследования, способны произвести техническую революцию, сравнимую с той, которую сделал на заре развития техники металл.

Тенденция сокращения времени между открытием явления и использованием этого явления в практике для создания новых технологий продолжает нарастать. В некоторых ситуациях происходит даже так, что острая необходимость создания технических систем нового поколения или потребность создания материалов с совершенно новыми возможностями диктует необходимость проведения научного поиска в требуемом направлении, т. е. реалии технического прогресса являются стимулирующим фактором проведения научного поиска.

Теоретической основой материаловедения являются соответствующие разделы физики и химии, однако наука о материалах в основном развивается экспериментальным путем. Поэтому разработка новых методов исследования строения (структуры) и физико-механических свойств материалов также способствует дальнейшему развитию материаловедения. Электронная микроскопия и нейтронография позволяют изучать кристаллические структуры, их дефекты и закономерности превращений под воздействием внешних факторов (температура, давление, воздействие электромагнитных полей и т. д.).

Изучение физических, механических, технологических и эксплуатационных свойств различных материалов позволяет определить области их рационального использования с учетом экономических требований.

Современное машиностроение является основным потребителем производимых в нашей стране металлов. В станкостроении, судостроении, автомобильной и авиационной промышленности, электронике и радиотехнике из металлов изготавливают огромное количество деталей машин и приборов.

Используемые в технике металлы подразделяются на две основные группы: черные и цветные. К черным металлам относятся железо и его сплавы (чугун, сталь, ферросплавы), а к цветным — все остальные металлы и их сплавы.

В общемировом производстве металлов более 90 % приходится на железо и его сплавы. Это объясняется ценными физическими и механическими свойствами черных металлов, а также тем, что железные руды широко распространены в природе, к тому же производство чугуна и стали сравнительно дешево и просто.

Наряду с черными металлами большое значение в технике имеют и цветные металлы, обладающие ценными физико-химическими свойствами, которыми не обладают черные металлы. Практически во всех отраслях промышленности широко используются цветные металлы, такие как алюминий, магний, медь, никель, титан, вольфрам, а также бериллий, германий, кремний и др.

Особое развитие во второй половине XX в. получило производство синтетических материалов — пластмасс. Пластмассы и другие неметаллические материалы, используемые в конструкциях машин и механизмов вместо металлов и сплавов, позволяют повысить сроки службы ряда деталей и узлов машин и установок, уменьшить массу конструкций, экономить дефицитные цветные металлы и сплавы, снизить стоимость и трудоемкость обработки. Рациональный выбор материалов и совершенствование технологических процессов их обработки обеспечивают надежность конструкций, снижают их себестоимость и повышают производительность труда.

Большой вклад в развитие науки о материалах внесли русские и советские ученые. П. П. Аносов (1799 — 1851) впервые установил связь между строением стали и ее свойствами. Д. К. Чернов (1839 — 1921), открывший полиморфизм стали, является основоположником научного металловедения. Работы Н. С. Курнакова (1860 — 1941) и его учеников имели большое значение для развития методов физико-химического исследования и классификации сложных фаз в металлических сплавах. С именами С. С. Штейнберга (1872 — 1940), Н. А. Минкевича (1883 — 1942) и Н. Т. Гудцова (1885 — 1957) связана разработка теории и технологии термической обработки стали. Крупные советские ученые С. Т. Конобеевский, Г. В. Курдюмов, В. Д. Садовский, А. А. Бочвар, С. Т. Кишкин, Н. В. Агеев и ряд других исследовали механизм и кинетику фазовых превращений в металлических сплавах.

Крупнейший химик А. М. Бутлеров (1828 — 1886) создал теорию химического строения органических соединений и научную основу для разработки синтетических полимерных материалов.

В. А. Каргин и его ученики выполнили структурные исследования, имевшие большое значение для развития полимерных материалов. Впервые в мире на основе работ С. В. Лебедева было создано промышленное производство синтетического каучука.

Среди зарубежных ученых большой вклад в изучение железоуглеродистых сплавов внесли А. Ле-Шателье (Франция), Р. Аустен (Великобритания), Ф. Османд (Франция) и др. Важнейшие рентгеноструктурные исследования сплавов провели М. Лауэ и П. Дебай (Германия), У. А. Брэгг и У. Л. Брэгг (Великобритания). Широко известны работы Э. Бейна, Р. Мейла (США) и Веллера (Германия) в области теории фазовых превращений в сплавах. Над созданием полимерных материалов работали К. Циглер (Германия) и Д. Натта (Италия).

Ускорение научно-технического прогресса проявляется в широком внедрении новейших технологий получения новых видов конструкционных материалов, выгодно отличающихся от традиционных по целому ряду показателей физических, технологических и эксплуатационных характеристик.

Современные технологии позволяют рационально использовать сырьевую базу путем более эффективного применения природных

материалов и внедрения новых технологических принципов обработки, в результате чего они приобретают новые свойства, расширяющие области их применения. Одновременно повышается экономическая эффективность использования природных сырьевых ресурсов благодаря разработке безотходных технологий производства, существенно уменьшающих загрязнение окружающей среды.

В связи с усложнением производства, а также значительным расширением номенклатуры производимых материалов будущим технологом и преподавателям технологии необходимо изучать теоретические основы, на которых базируются современные технологии получения новых материалов. Эти знания позволят участвовать в создании управляемых технологий и приобрести умения прогнозировать состав в целях обеспечения заданных свойств материалов.

При изложении материала в данном учебнике многообразно процессов, используемых в технологиях получения материалов, сведено к обобщенным физико-химическим закономерностям их протекания. Такая форма изложения способствует более глубокому пониманию технологических процессов получения наиболее важных для экономики материалов.

В гл. 2...7 учебника более подробно рассмотрены металлические конструкционные материалы, их строение, свойства и способы производства. В гл. 8...12 рассмотрены строение, свойства и способы получения неметаллических материалов, таких как древесина и древесные материалы, стекло, керамика и ее современные разновидности, пластмассы и эластики, материалы с особыми свойствами, вспомогательные материалы, а также масла, смазки и технологические жидкости.

В учебнике подробно описаны традиционные и прогрессивные технологические процессы, изменяющие свойства материалов в заданном направлении, приведены сведения по новейшим достижениям в области материаловедения, в том числе по разработкам различных видов неметаллических и композиционных материалов, а также обобщены основные сведения об этих важных для экономики материалах и дана оценка эффективности их применения в различных областях техники.

1.1. Сырье и материалы — вещественные элементы производства

Для изготовления любого изделия или продукта необходимо использовать вещественную основу, свойства которой полностью обеспечивают желаемый результат. Эта вещественная основа называется материалом.

Материалы — это вещественные элементы производства, составляющие значительную часть предметов труда, используемые для изготовления продукции и составляющие ее главную субстанцию¹.

К материалам в промышленности относятся сырье (продукция добывающих отраслей промышленности и сельского хозяйства) и прочие материалы (продукция первичной переработки сырья), которые непосредственно входят в состав продукции предприятия. Стоимость материалов полностью входит в стоимость изготовленных из них изделий.

Исходя из приведенных определений к материалам можно отнести все то, что человек преобразует на базе животного, растительного или минерального сырья и использует в трудовом процессе в качестве исходного вещества для производства продукции или применяет в качестве вспомогательного вещества для проведения и поддержания производственного процесса.

Материалы, используемые в производственном процессе как главная составная часть выпускаемой продукции, относятся к *основным материалам*, а материалы, используемые, как правило, для производственно-эксплуатационных нужд и не входящие в состав выпускаемой продукции, — к *вспомогательным материалам*.

Материал, относящийся к группе основных, как образующая субстанция продукции участвует в производстве в течение всего производственного цикла, и его стоимость полностью переносится на стоимость изготовленной продукции (например, стоимость древесины полностью входит в стоимость изделий мебельной промышленности; стоимость инструментальной стали на инструментальном заводе — в стоимость инструмента; стоимость сахарной свеклы на сахарозаводе — в стоимость сахара).

¹ *Субстанция* (от *лат.* substantia) — сущность; нечто, лежащее в основе.

Подразделение материалов на основные и вспомогательные зависит от их применения в данной отрасли промышленности, в конкретном производственном процессе. В одной отрасли промышленности материалы определенного вида относятся к основным (бумага на полиграфическом комбинате), составляя значительную часть себестоимости продукции¹, а в другой отрасли тот же материал будет относиться к вспомогательным (бумага, используемая для упаковки продукции сахара, и т. п.).

Удельный вес затрат на вспомогательные материалы в себестоимости продукции в зависимости от отрасли промышленности составляет от 2,9 до 11,0 %.

Материалы являются существенным условием любого производства и в ходе производственного процесса представляют собой объект человеческого труда.

Ряд материалов известен человечеству и используется им с древних времен, так как, находясь в тесной зависимости от окружающего мира, люди вступали во взаимодействие с природой, преобразуя место своего существования. К таким традиционным материалам можно отнести камень, древесину, глину, металлы, лен, хлопок, шерсть и т. п.

Новые материалы внедряются лишь тогда, когда применявшихся до сих пор материалов или уже нет в достаточном количестве, или их свойства не удовлетворяют возросшим научно-техническим, экономическим или экологическим требованиям. Так, в нашем быту появились изделия из полимеров (пластмассы), резины, химических волокон и ряда других материалов.

1.2. Сырье — основа материала

Сырье — сырые материалы, предмет труда, который был уже изменен под воздействием труда (добыты полезные ископаемые, выращен лен и т. п.) и подлежит дальнейшей переработке (выплавление металла из металлосодержащих руд, производство пряжи и нитей из льна). Роль сырья в производственном процессе и его экономическое значение совпадают с ролью и значением основных материалов.

Основу сырья дает нам природа. Человеческий труд превращает в сырье природные богатства (75 % из которых — полезные ископаемые, а 25 % — продукты сельского, лесного и морского хозяйства), т. е. по происхождению сырье подразделяется на промышленное и сельскохозяйственное.

Промышленное сырье, в свою очередь, подразделяется на минеральное и искусственное. Доля последнего в общем объеме промыш-

¹ *Себестоимость продукции* — денежные издержки предприятий на производство и реализацию продукции.

ленного производства все возрастает. По сфере использования минеральное сырье подразделяется на топливно-энергетическое (нефть, природный газ, уголь, горючие сланцы, уран), металлургическое (руды черных, цветных, редких и благородных металлов), горно-химическое (агрономические руды, барит, плавиковый шпат, сера), техническое (алмазы, графит, слюда), сырье для производства строительных материалов (цементное, керамическое) и др.

К искусственному сырью относятся синтетические смолы и пластмассы, синтетический каучук, заменители кожи и др.

Сельскохозяйственное сырье, а также сырые материалы лесной и рыбной промышленности и заготовок подразделяются на растительное сырье (зерновые и технические культуры, древесина, дикорастущие и лекарственные растения) и сырье животного происхождения (мясо, рыба, молоко, сырье кожи, шерсть).

Классификация сырья и материалов как вещественной основы любой отрасли производства и потребления представлена на рис. 1.1 ... 1.3.

В некоторых отраслях промышленности практическое значение имеет подразделение сырья на *первичное*, которое выделяется из природного состояния и вводится на первой технологической ступени



Рис. 1.1. Кругооборот сырья и материалов по схеме сырье—материал—изделие

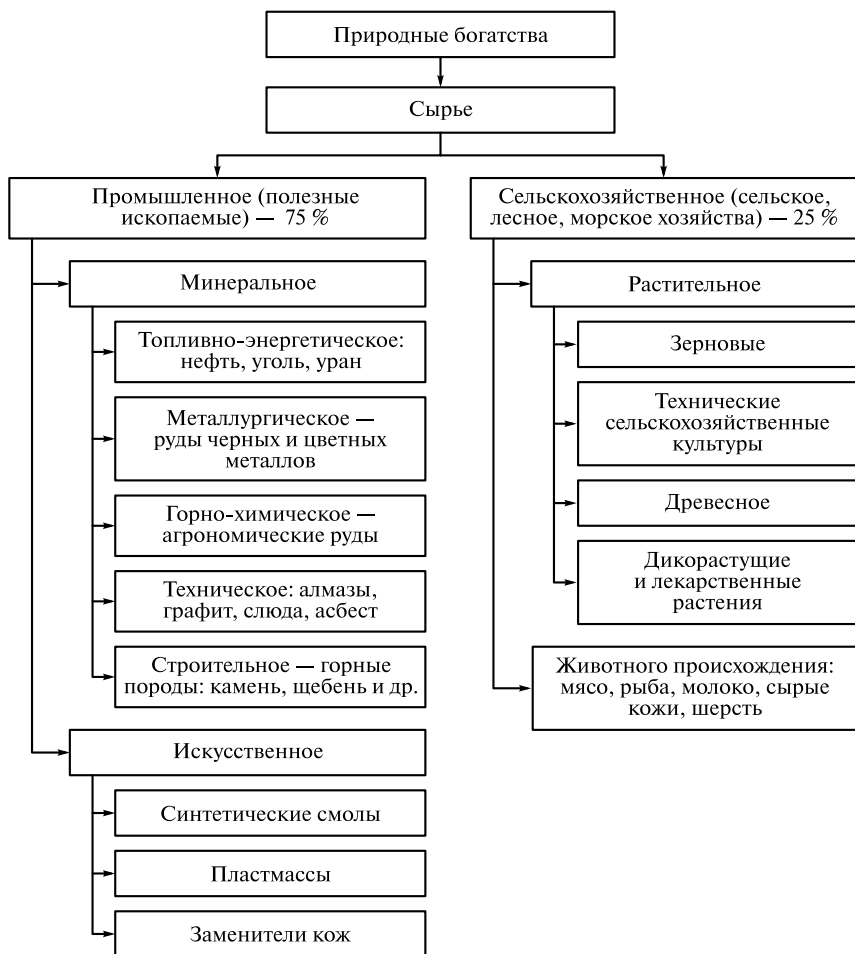


Рис. 1.2. Классификация сырья

пени дальнейшей переработки (в металлургии — руды; в бумажной промышленности — целлюлоза), и *вторичное*, которое выделяется на определенной ступени производственного или индивидуального потребления и повторно вводится в производственный процесс (металлолом, макулатура). Правильное использование вторичного сырья обеспечивает экономию общественного труда.

Комплексная (глубокая) переработка первичного сырья — один из основных путей повышения экономической эффективности промышленного производства.

Переход от полезного ископаемого или другого вида природного богатства к сырью осуществляется с помощью человеческого труда,

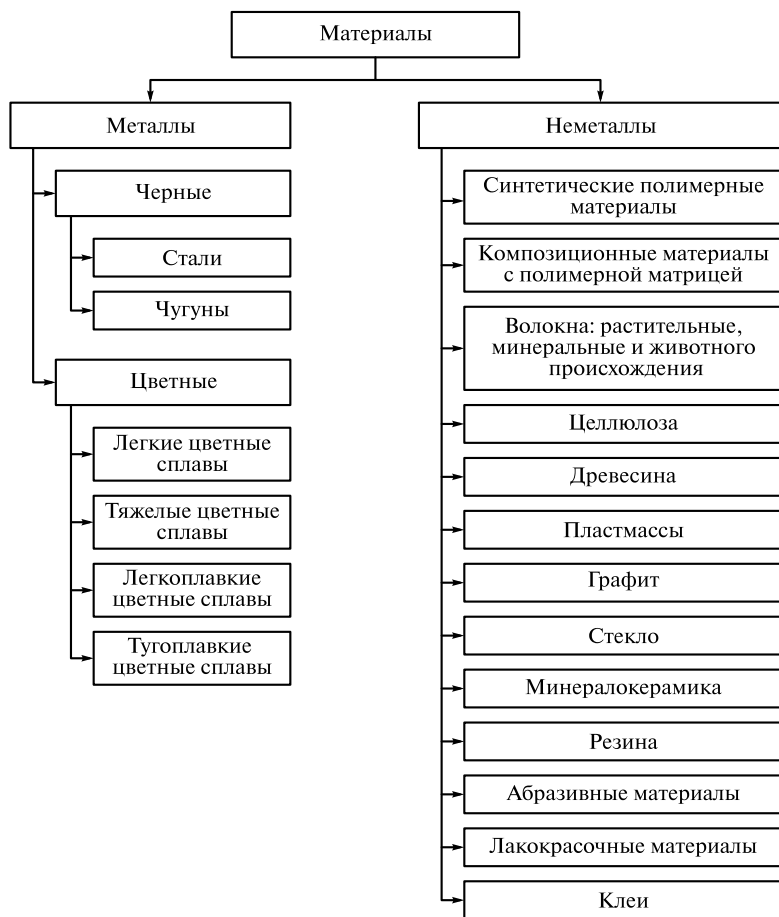


Рис. 1.3. Классификация материалов, применяемых в промышленном производстве

который выделяет исходное вещество из природного состояния. На этой ступени оно становится предметом потребления, средством производства.

1.3. Строение и свойства материалов

Кристаллические и аморфные тела. В природе существуют две разновидности твердых тел, различающиеся по своим свойствам: кристаллические и аморфные. *Кристаллические тела* при нагрева-

нии остаются твердыми до определенной температуры (температуры плавления), при которой они переходят в жидкое состояние. При охлаждении процесс протекает в обратном направлении. В кристаллических телах переход из одного состояния в другое происходит при определенной температуре плавления.

Аморфные тела при нагреве размягчаются в большом температурном интервале — сначала они становятся вязкими, а затем переходят в жидкое состояние. При охлаждении процесс протекает в обратном направлении.

Кристаллическое состояние твердого тела более стабильно (энергетически более выгодно), чем аморфное, поэтому при определенных условиях аморфные тела переходят в кристаллическое состояние.

Аморфные тела можно рассматривать как жидкости с повышенной вязкостью, имеющие пониженную подвижность частиц. Аморфное состояние можно зафиксировать во многих органических и неорганических веществах их ускоренным охлаждением из жидкого состояния. Однако при повторном нагреве и длительной выдержке при температурах ниже температуры плавления (в некоторых случаях и при деформации) нестабильность аморфного состояния твердого тела проявляется в частичном или полном его переходе в кристаллическое состояние. Примерами такого перехода могут служить помутнение неорганических стекол при нагреве и оптики при длительном использовании; частичная кристаллизация плавленого янтаря при нагреве и дополнительная кристаллизация капроновой нити при растяжении, сопровождающаяся упрочнением, и т. п.

В обычных условиях (при нормальной температуре и давлении) все металлы и их сплавы являются кристаллическими телами. Характерными признаками кристаллических тел являются непрозрачность, блеск, хорошая электро- и теплопроводность, пластичность, а для многих металлов также способность свариваться. Не потеряло своего научного значения определение металлов, данное более 200 лет назад великим русским ученым М. В. Ломоносовым: «Металлы — суть светлые тела, которые ковать можно».

Для металлов характерно то, что, вступая в химические реакции с элементами, являющимися неметаллами, они частично отдают последним свои внешние, валентные, электроны. Это объясняется тем, что у атомов металла внешние электроны не прочно связаны с его ядром. Металлы имеют на наружных оболочках всего один-два электрона (реже три-четыре), тогда как у неметаллов таких электронов больше.

Чистые металлы (например, железо, медь, алюминий и др.) могут образовывать друг с другом химические соединения (Cu_2Mg) или твердые растворы, в состав которых могут входить несколько элементов-металлов, часто с примесью заметных количеств элементов-неметаллов. Такие вещества называются *металлическими сплавами*.

Простые вещества, образующие сплав, называются *компонентами* сплава.

Для описания кристаллической структуры металлов пользуются понятием кристаллической решетки. *Кристаллическая решетка* — это воображаемая пространственная сетка, в узлах которой располагаются атомы (ионы), образующие металл. Частицы вещества (ионы, атомы), из которых построен кристалл, расположены в определенном геометрическом порядке, который периодически повторяется в пространстве.

В аморфных телах (стекло, пластмассы), в отличие от кристаллов, атомы располагаются в пространстве беспорядочно, хаотично.

Формирование кристаллической решетки в металле происходит следующим образом. При переходе металла из жидкого состояния в твердое расстояние между атомами уменьшается, а силы взаимодействия между ними возрастают. Характер взаимодействия атомов определяется строением их внешних электронных оболочек. При сближении атомов электроны, находящиеся на внешних оболочках, теряют связь со своими атомами вследствие отрыва валентного электрона одного атома положительно заряженным ядром другого и т.д. Происходит образование свободных электронов, так как они не принадлежат отдельным атомам. Таким образом, в твердом состоянии металл представляет собой структуру, состоящую из нейтральных атомов и положительно заряженных ионов, «омываемых» свободными электронами.

Связь в металле осуществляется электростатическими силами. Между ионами и свободными электронами возникают электростатические силы притяжения, которые стягивают ионы. Такая связь между частицами металла называется *металлической*.

Силы связи в металлах определяются силами отталкивания и силами притяжения между ионами и электронами. Ионы находятся на таком расстоянии друг от друга, при котором потенциальная энергия взаимодействия минимальна. В металле ионы располагаются в определенном порядке, образуя кристаллическую решетку.

Наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла в любом его объеме, называется *элементарной кристаллической ячейкой*. Такое расположение ионов обеспечивается взаимодействием их с валентными электронами, которые связывают ионы в кристаллической решетке. Типы кристаллических решеток у разных металлов различны. Наиболее часто встречаются следующие типы решеток (рис. 1.4):

- 1) объемно-центрированная кубическая (ОЦК);
- 2) гранецентрированная кубическая (ГЦК);
- 3) гексагональная плотноупакованная (ГПУ).

Объемно-центрированная кубическая решетка не обладает большой плотностью упаковки. Кристаллическую структуру ОЦК имеют α -Fe, Cr, W, Mo, V, Ta, β -Ti, Nb, β -Zr; гранецентрированную куби-

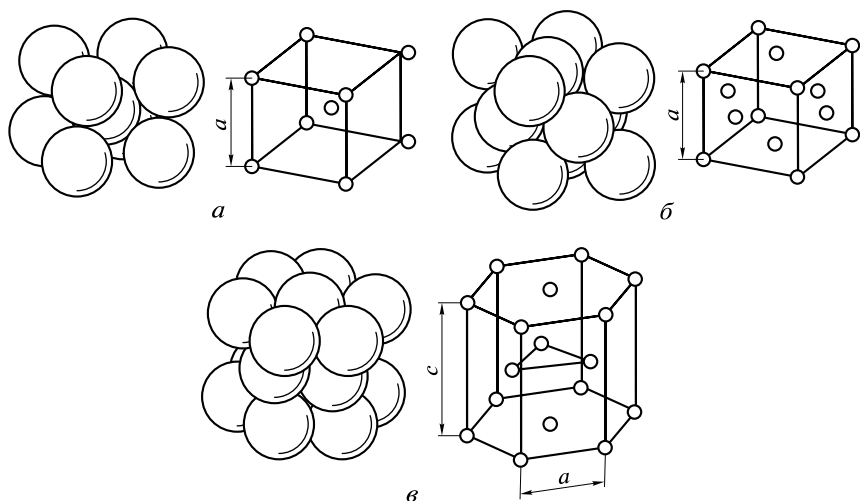


Рис. 1.4. Элементарные ячейки кристаллических решеток:

a — объемно-центрированная кубическая (α -Fe); b — гранецентрированная кубическая (Cu); c — гексагональная плотноупакованная (Mg, Zn); a, c — параметры решетки

ческую — γ -Fe, Al, Cu, Ni, Ag, Au, Pt и Pb; гексагональную плотноупакованную — Mg, Zn и др.

Кристаллическая решетка характеризуется ее параметрами, например длиной ребра куба a — для ОЦК и ГЦК (рис. 1.4, a, b), которая составляет для разных металлов $(2,8 \dots 6,0) \cdot 10^{-8}$ см.

Аллотропия металлов. *Аллотропией*, или *полиморфизмом*, называется способность металла в твердом состоянии иметь различные кристаллические формы. Процесс перехода из одной кристаллической формы в другую называется *аллотропическим превращением*.

При нагреве чистого металла такое превращение сопровождается поглощением теплоты и происходит при постоянной температуре, что связано с необходимостью затраты определенной энергии на перестройку кристаллической решетки. Аллотропические превращения имеют многие металлы: железо, олово, титан и др. Например, железо в интервале температур $911 \dots 1392$ °C имеет гранецентрированную кубическую решетку — γ -Fe (рис. 1.5), до 911 °C — объемно-центрированную кубическую решетку — α -Fe, в интервале температур $1392 \dots 1539$ °C — также объемно-центрированную кубическую решетку — δ -Fe.

Аллотропические формы металла обозначаются буквами α, β, γ и т.д. Аллотропическая форма, существующая при самой низкой температуре, обозначается греческой буквой α ; при более высоких температурах — β, γ, δ и т.д. Греческая буква в виде индекса добавляется к символу химического элемента металла. При аллотропических

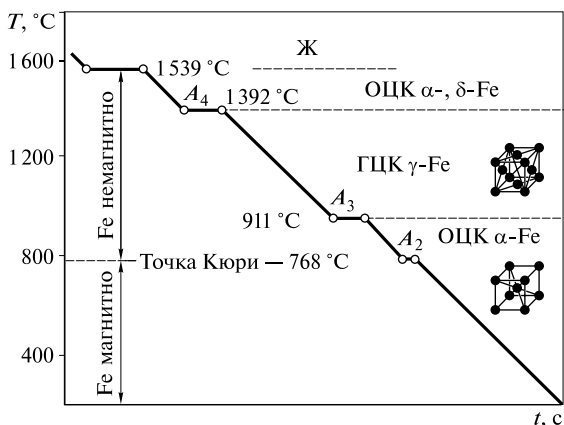


Рис. 1.5. Аллотропические превращения в железе

превращениях происходит изменение свойств металлов — изменение объема (особенно характерно для олова) и растворимости углерода (характерно для железа).

Дефекты в кристаллах. В реальных кристаллах всегда имеются дефекты (несовершенства) строения, обусловленные нарушением правильного расположения атомов кристаллической решетки. Дефекты кристаллического строения подразделяются по геометрическим признакам на точечные, линейные и поверхностные. Размеры точечных дефектов соизмеримы с межатомным расстоянием; у линейных дефектов длина на несколько порядков больше ширины; у поверхностных дефектов мала толщина, а ширина и длина больше ее на несколько порядков. Объемные дефекты (поры, трещины) имеют значительные размеры во всех трех направлениях.

К самым простым *точечным дефектам* относятся вакансии, межузельные атомы основного вещества и чужеродные атомы внедрения. *Вакансией* называется пустой узел кристаллической решетки. *Межузельным* называется атом, перемещенный из узла в позицию между узлами. Атомы совершают колебательные движения возле узлов решетки, и с повышением температуры амплитуда этих колебаний увеличивается. Большинство атомов данной кристаллической решетки имеет одинаковую (среднюю) энергию и колеблется при данной температуре с одинаковой амплитудой. Однако отдельные атомы, обладающие энергией, значительно большей средней энергии, способны перемещаться из одного места в другое.

Наиболее легко перемещаются атомы поверхностного слоя, выходя на поверхность. Место, где ранее находился такой атом, называется вакансией (рис. 1.6, а). На его место через некоторое время переходит один из атомов соседнего слоя, получивший дополнительную энергию, достаточную для такого перехода, и т.д. Таким образом,

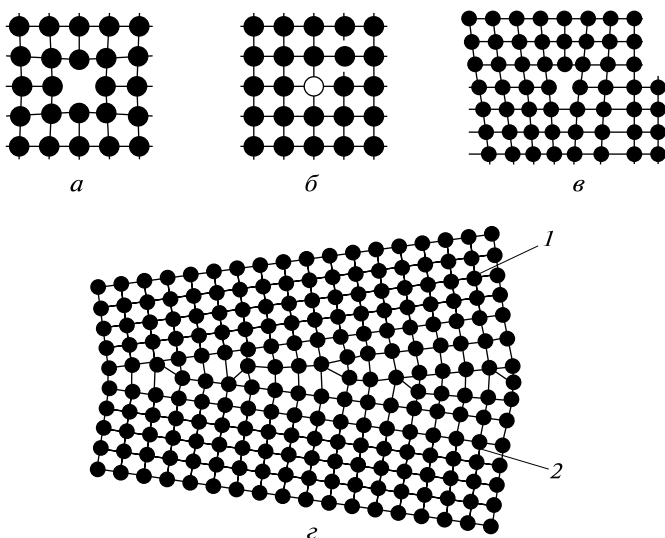


Рис 1.6. Дефекты в кристаллах:

a — вакансии; *б* — внедренный атом; *в* — краевая (линейная) дислокация; *з* — неправильное расположение атомов на границе зерен *1* и *2*

вакансия продвигается в глубь кристалла. С повышением температуры количество вакансий увеличивается и они чаще перемещаются из одного узла в другой. В диффузионных процессах, протекающих в металлах, вакансии играют определяющую роль.

К точечным дефектам относится также атом, *внедренный* в междоузлие кристаллической решетки (рис. 1.6, *б*), и замещенный атом, когда место атома одного металла замещается в кристаллической решетке другим, чужеродным, атомом. Точечные дефекты вызывают местное искажение кристаллической решетки.

Линейные дефекты являются важнейшим видом несовершенства кристаллической решетки. Такой дефект возникает в результате сдвига на одно межатомное расстояние одной части решетки относительно другой вдоль какой-либо плоскости. При этом число рядов атомов в верхней части решетки становится на один больше, чем в нижней. В верхней части решетки появляется как бы лишняя атомная плоскость (экстраплоскость). Край экстраплоскости, перпендикулярный направлению сдвига, называется краевой, или линейной, дислокацией (рис. 1.6, *в*), длина которой может достигать многих тысяч межатомных расстояний. Шириной дислокации считают расстояние от центра дефекта до неискаженного участка кристаллической решетки. Ширина дислокации мала и составляет несколько атомных расстояний.

Кристаллическая решетка в зоне дислокации упруго искажена, поскольку атомы в этой зоне смещены относительно их равновесного состояния. Дислокации обладают высокой подвижностью. Это объясняется тем, что атомы, образующие дислокацию, стремятся переместиться в равновесное состояние. Дислокации образуются в процессе кристаллизации металлов (см. подразд. 1.4), а также при пластической деформации, термической обработке и других процессах. Плотность дислокаций (отношение суммарной длины всех линий дислокаций к единице объема), возникающих при кристаллизации, пластической деформации и других видах обработки металлов, очень высока, поэтому они значительно влияют на свойства материалов.

Поверхностные дефекты возникают на границах раздела между отдельными кристаллами (рис. 1.6, з). На границе раздела атомы кристалла расположены менее правильно, чем в его объеме. Кроме того, по границам раздела скапливаются дислокации и вакансии, а также концентрируются примеси, что еще больше нарушает порядок расположения атомов. При этом сами кристаллы разориентированы, т. е. могут быть повернуты относительно друг друга на десятки градусов.

Поверхностные дефекты влияют на механические и физические свойства материалов. Особенно большое значение имеют дефекты, расположенные на границах зерен. Так, один из важнейших показателей механических свойств материала — предел текучести при растяжении σ_T — связан с размером зерен d зависимостью

$$\sigma_T = \sigma_0 + kd^{-1/2},$$

где σ_0 и k — постоянные для данного материала.

Чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения. Прочность металла может либо увеличиваться вследствие искажений кристаллической решетки вблизи границ, либо уменьшаться из-за наличия примесей и концентрации дефектов.

Анизотропия кристаллов. Неодинаковость физических свойств среды в разных направлениях называется *анизотропией*. Анизотропия кристаллов обусловлена различием плотности упаковки атомов в решетке в различных направлениях. Все кристаллы анизотропны, а аморфные тела (стекло, смола) *изотропны*, т. е. имеют одинаковую плотность атомов в различных направлениях. Анизотропия свойств важна при использовании монокристаллов — одиночных кристаллов, частицы которых расположены единообразно по всему их объему. Монокристаллы имеют правильную кристаллическую огранку (в форме естественных многогранников), анизотропны по механическим, электрическим и другим физическим свойствам. Так, для монокристалла меди предел прочности σ_B изменяется от 120 до 360 МПа, в зависимости от направления приложения нагрузки.

Металлы и сплавы, применяемые в технике, обычно имеют поликристаллическую структуру, т. е. состоят из множества мелких и различно ориентированных кристаллов, не имеющих правильной кристаллической огранки и называемых кристаллитами (или зернами). В каждом зерне поликристалла наблюдается анизотропия. Однако вследствие разнообразной, беспорядочной, ориентации, кристаллографических плоскостей в различных зернах поликристалл может иметь одинаковые свойства по разным направлениям и не обнаруживать анизотропию (когда размеры зерен значительно меньше размеров поликристалла и количество их очень велико). Это обстоятельство во многих случаях позволяет рассматривать поликристаллическое тело как подобное изотропному, несмотря на анизотропию свойств отдельных составляющих его зерен.

Жидкие кристаллы. Жидкости с упорядоченной молекулярной структурой называются *жидкими кристаллами*. Благодаря упорядоченности молекул они занимают промежуточное положение между кристаллами и обычными жидкостями с беспорядочным расположением молекул. Жидкие кристаллы текучи, как обычные жидкости, но в то же время обладают анизотропией свойств, как кристаллы.

Известно много жидких кристаллов, но наиболее важное значение имеют органические вещества с молекулами удлиненной формы, определяющей характер межмолекулярного взаимодействия таких веществ. При плавлении веществ молекулы располагаются в определенном порядке и промежуточное состояние с упорядоченной таким образом структурой сохраняется в интервале температур от точки плавления вещества до точки перехода жидкого кристалла в изотропную жидкость. При переходе из-за усилившихся тепловых колебаний упорядоченная молекулярная структура полностью исчезает, увеличивается прозрачность вещества.

По структуре жидкие кристаллы подразделяются на три класса: I класс — нематические; II класс — смектические; III класс — холестерические (рис. 1.7).

В кристаллах первого класса молекулы выстроены в цепочки. Направление преимущественной ориентации молекул является оптической осью жидкого кристалла. В кристаллах второго класса молекулы образуют параллельные слои, которые легко смещаются друг относительно друга. В кристаллах третьего класса молекулы размещаются по пространственной спирали.

Длинные молекулы образуют параллельные слои, в каждом слое имеется структура жидкого кристалла первого класса. Направление преимущественной ориентации плавно меняется при переходе от слоя к слою, образуя спираль с определенным шагом. Ориентационный порядок в расположении молекул создает анизотропию: показатель преломления света, диэлектрическая проницаемость, удельное электрическое сопротивление, вязкость и многие другие свойства зависят от направления, вдоль которого измеряют их величины (например,

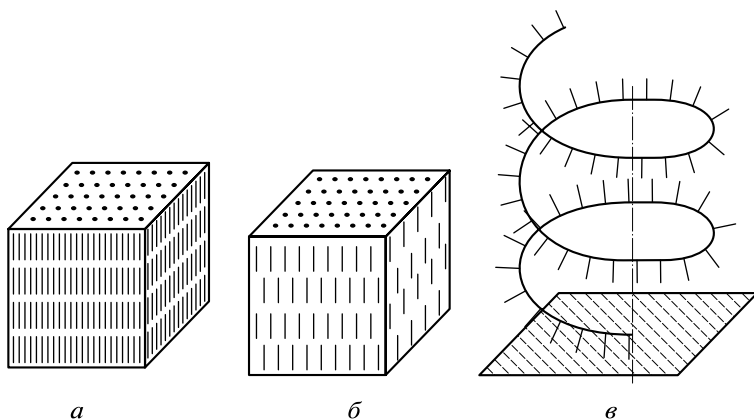


Рис. 1.7. Классы жидких кристаллов:
a — нематические; *б* — смектические; *в* — холестерические

параллельно или перпендикулярно осям молекул). В частности, в жидких кристаллах, являющихся диэлектриками, удельное объемное электрическое сопротивление, измеренное перпендикулярно молекулярным цепям, достигает $10^{12} \dots 10^{14}$ Ом/м³, а вдоль молекулярных цепей — на несколько порядков ниже.

Структура жидких кристаллов легко изменяется под действием давления, электрического поля, нагрева. Это дает возможность управлять их свойствами путем слабых воздействий и делает жидкие кристаллы незаменимыми материалами для изготовления особо чувствительных индикаторов.

Способность жидких кристаллов первого и третьего классов изменять оптические свойства под влиянием электрического поля и температурных условий широко используется в приборостроении.

В промышленности используются как индивидуальные жидкокристаллические органические соединения, так и их эвтектические смеси. На основе жидких кристаллов изготавливают медицинские термометры, датчики температуры для контроля нагрева узлов и деталей, преобразователи невидимого инфракрасного излучения в видимый свет. В последнем случае поглощение инфракрасного излучения нагревает жидкий кристалл так, что изменяется окраска отраженного света. Жидкие кристаллы применяются в модуляторах, системах отображения информации: калькуляторах, ручных часах, измерительных приборах автомобилей, устройствах для отклонения светового потока и др.

Структура полимеров, стекла и керамики. *Полимеры* — это высокомолекулярные соединения (рис. 1.8), имеющие линейную, разветвленную или пространственную структуру. Полимеры обладают большой молекулярной массой (более 10^4). Молекулы полимеров

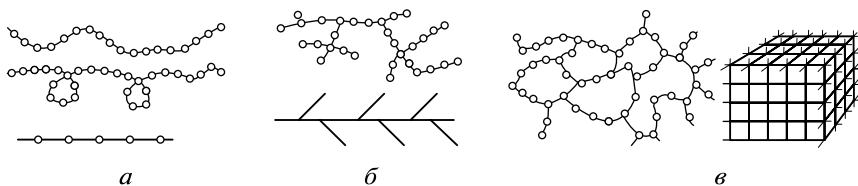


Рис. 1.8. Структура полимеров:

a — линейная; *б* — разветвленная; *в* — пространственная

состоят из одинаковых групп атомов — звеньев. Каждое звено представляет собой измененную молекулу исходного низкомолекулярного вещества — мономера. При получении полимеров молекулы мономеры объединяются друг с другом и образуют длинные линейные молекулы, или макромолекулы, в которых атомы соединены ковалентными связями.

Полимеры, у которых макромолекулы состоят из однотипных по химическому составу и строению молекул, называются *гомополимерами*, из разнотипных — *сополимерами*.

Полимер, у которого макромолекулы состоят из разнородных относительно крупных звеньев (осколков макромолекул), называется *блок-сополимером*. Если к макромолекулам прививаются боковые отростки макромолекул другого вещества, то получаются *привитые сополимеры* (рис. 1.9).

Создавая привитые сополимеры, можно получать материалы с новыми, заранее заданными, свойствами. В зависимости от характера связи между линейными молекулами полимеры подразделяются на термопластичные и термореактивные. Различие между ними отчетливо обнаруживается при их нагреве.

Термопластичные полимеры способны многократно размягчаться при нагреве и твердеть при охлаждении без изменения своих свойств.

Термореактивные полимеры при нагреве остаются твердыми вплоть до полного термического разложения. Это различие поведения при нагреве объясняется тем, что у термопластичных полимеров

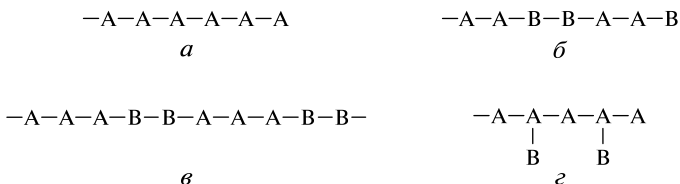


Рис. 1.9. Схемы строения полимеров:

a — обычный полимер; *б* — сополимер; *в* — блоксополимер; *г* — привитой сополимер

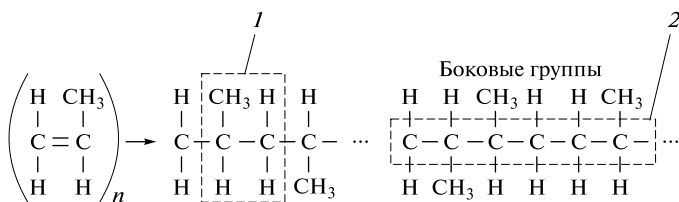


Рис. 1.10. Схема строения линейной макромолекулы:

1 — звено; 2 — главная цепь

между молекулами действуют слабые силы Ван-дер-Ваальса. При нагреве связи между молекулами значительно ослабевают, материал становится мягким и податливым. У термореактивных полимеров кроме сил Ван-дер-Ваальса имеются поперечные ковалентные связи между молекулами. Благодаря этому материал остается твердым при нагреве (рис. 1.10).

Полимеры могут находиться в аморфном и кристаллическом состояниях. При переходе полимера из аморфного состояния в кристаллическое существенно меняются его физико-механические свойства, повышаются прочность и теплостойкость. Под действием теплоты аморфные полимеры переходят из твердого (стеклообразного) состояния в высокоэластичное и вязкотекучее (рис. 1.11).

Из термомеханической кривой аморфного полимера видно, что в температурной зоне I вещество находится в стеклообразном состоянии, деформация δ мала и увеличивается пропорционально температуре. Выше температуры стеклования t_c полимер становится высокоэластичным (зона II), а выше температуры текучести t_T — вязкотекучим (зона III).

Теплостойкость полимерного материала характеризуется температурой стеклования. Знание температур стеклования и текучести позволяет обоснованно назначать температурные интервалы формирования изделий из полимеров.

Для кристаллических полимеров термомеханические кривые имеют иной вид, чем для аморфных полимеров. Некоторые полимеры с увеличением температуры разлагаются, не переходя в вязкотекучее состояние.

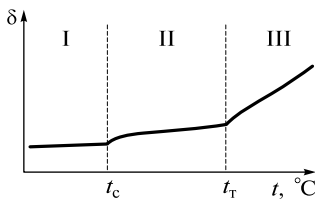


Рис. 1.11. Термомеханическая кривая аморфного полимера