

В.В.Плошкин. Материаловедение. 2011 М.: Юрайт. 2012.

В библиотеке СГУ имеется



В библиотеке СГУ не имеется

Солнцев Ю. П., Борзенко Е. И., Вологжанина С. А.

Материаловедение. Применение и выбор материалов. Учебное пособие.

СПб: Химиздат, 2007. - 200 с. (**университетская библиотека online**)

Введение

Материаловедение и технология материалов относятся к тем дисциплинам, которые формируют основу инженерной подготовки технического специалиста, являются показателями его технической образованности. Наличие необходимых материалов, технологических процессов позволяет претворить идею, замысел разработчика, конструктора в конкретное изделие — нужную для человека техническую продукцию. Повышение качества изделий, рост производительности труда, а в итоге — конкурентоспособности потребовали создания материалов с уникальными свойствами и новых технологических процессов их обработки. Особенно это заметно в авиационно-космической, электронной, радиотехнической, атомной промышленности. Поэтому справедливо утверждение, что производственный и экономический потенциал любой страны в значительной степени определяется состоянием ее материаловедческой и технологической базы, уровнем развития науки и техники. Если в далекие годы технологию могли рассматривать как простое ремесло, то сейчас материаловедение и технология представляют собой обширную, сложную область знаний, базирующуюся на многих смежных, и прежде всего фундаментальных, науках — физике, химии, математике.

Раздел I

СТРУКТУРА МАТЕРИАЛОВ

Глава 1

ВВЕДЕНИЕ В НАУКУ О МАТЕРИАЛАХ

1.1. Наука о материалах

Первые шаги на пути к реальному пониманию свойств материалов были сделаны с наступлением XIX в. Начало этому положила химия, затем физика. Теоретическая химия оказалась весьма полезной и при решении практических вопросов, способствовала появлению более эффективных методов обработки материалов. Так, известный физик Майкл Фарадей (1791–1867) использовал химический анализ при изучении свойств булатной стали. Затем знаменитый русский металлург Павел Петрович Аносов (1799–1851) при исследовании структуры булатной стали одним из первых (в 1831 г.) использовал микроскоп. Он увидел, что булатные узоры связаны со структурой стали и с ее механическими свойствами. Анализ структуры металлов и различных минералов с помощью оптического микроскопа в дальнейшем нашел широкое распространение в трудах английского геолога Генри Сорби (1826–1908).

Эти первые наблюдения изменений, происходящих с внутренней структурой металла, а также новые сведения о со-



ставе вещества, полученные с помощью химии, существенно изменили представления о возможности проникновения в природу материалов.

В последней четверти XIX в. химия и физика уже играли ключевую роль в развитии многих сложившихся к тому времени отраслей, связанных с производством материалов. Здесь уместно отметить роль русского ученого Дмитрия Константиновича Чернова (1839–1921) в становлении науки о материалах. На заседании Российского технического общества в 1868 г. он сообщил об открытии критических точек сталей, впоследствии названных «точками Чернова». На основе глубокого научного анализа Д.К. Чернов объяснил удивительные свойства булатной стали. Его труды ускорили становление науки о материаловедении как точной науки.

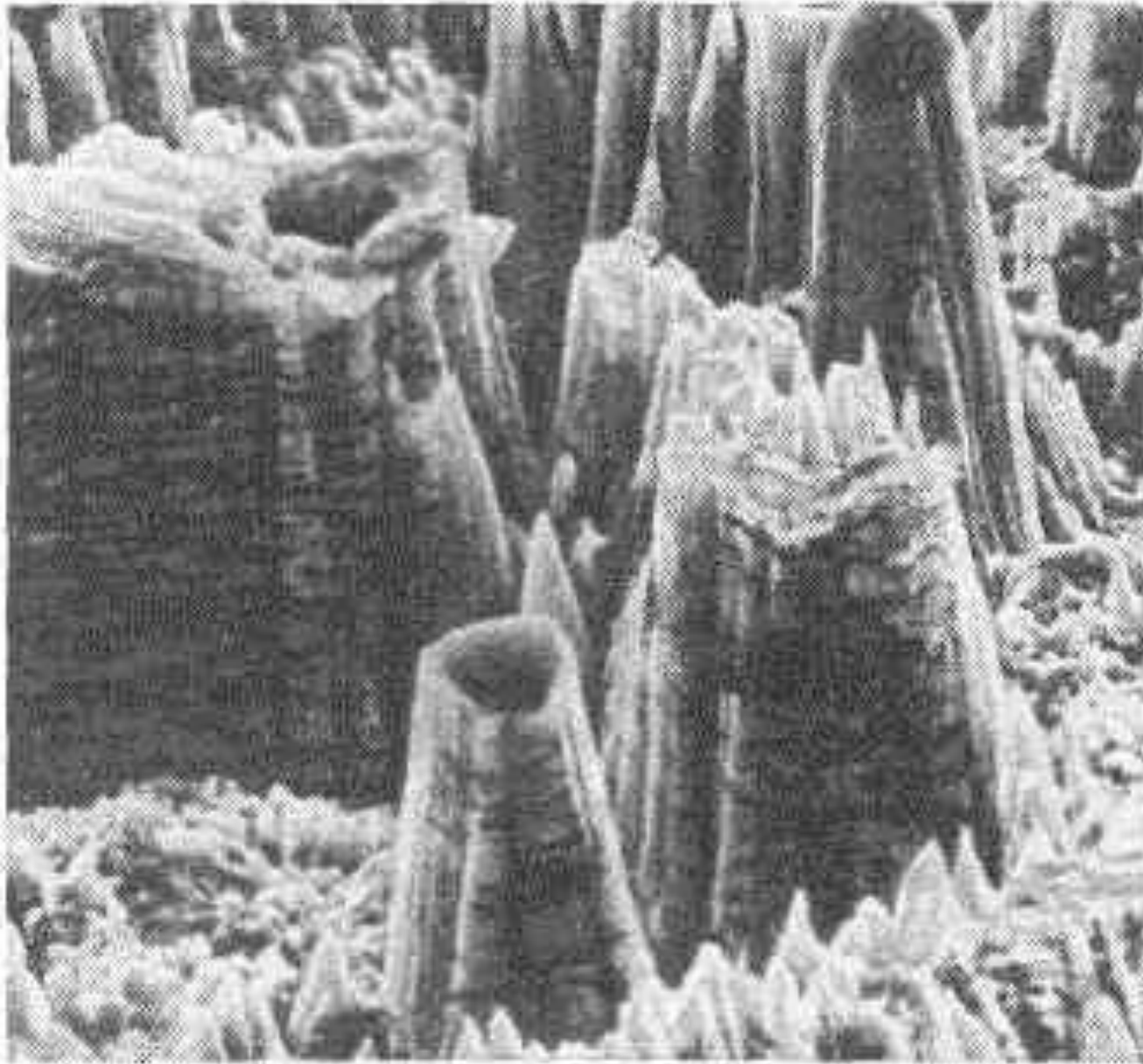
В XX столетии химикам и физикам удалось сделать ряд фундаментальных открытий, на которые опираются все современные разработки новых материалов и технологические методы их получения и обработки.

Основной вклад науки в рассматриваемую область состоял в том, что ученым удалось установить взаимосвязь между внешне проявляющимися свойствами материалов и их внутренним строением. Как выяснилось, материалам свойственна определенная внутренняя архитектура, иными словами — иерархическая последовательность структурных уровней, что объясняло многообразие проявляемых материалами свойств. Это предполагало, что поведение того или иного материала можно предсказать заранее, если тщательно изучить его внутреннюю архитектуру.

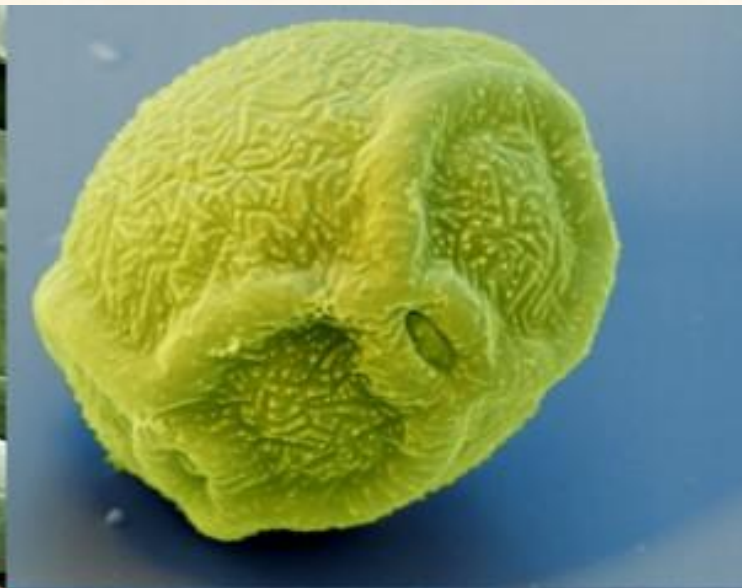
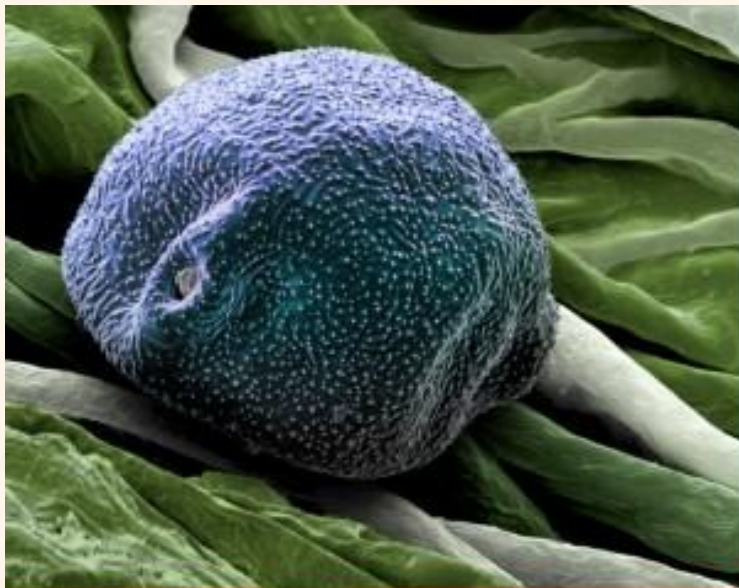
Появление новых приборов и методов позволило глубже проникнуть в природу материалов. П.П. Аносов и Г.Сорби с помощью оптического микроскопа сумели разглядеть лишь микроструктуру стали. Со временем на смену оптическому пришел электронный микроскоп, позволивший увидеть элементы субструктуры, а затем — растровый электронный микроскоп, с помощью которого стало возможным получать информацию о пространственной структуре поверхности. Кар-



Растровый электронный микроскоп



Изображение поверхности в растровом электронном микроскопе



Изображение пыльцы в растровом электронном микроскопе

тину пространственного расположения атомов и молекул в кристалле можно получить методом дифракции рентгеновских лучей, а характерные особенности атомов того или иного материала – различными методами спектроскопии, основанными на возбуждении атомов исследуемого материала.

Раскрытие внутренней структуры материалов создало основу для понимания твердого состояния вещества вообще и конкретных материалов в частности. Объединение знаний, полученных теоретическим и опытным путем, позволило не только разработать более эффективные методы обработки природных материалов, но и создать огромное количество новых искусственных материалов, таких, как синтетические волокна и пластмассы; высоконапряженные и жаропрочные металлические сплавы; стеклянные волокна, используемые в качестве оптических волокон; магниты, изготовленные из редкоземельных элементов; различные виды высоконапряженной керамики; композиты и полупроводники, составляющие основу современной микроэлектроники.

Эти результаты достигнуты наукой, сформировавшейся на основе интеграции различных дисциплин и получившей название материаловедение. Ее представители имеют дело с изучением взаимосвязей между структурой, свойствами и поведением материалов, а также зависимости этих взаимосвязей от методов обработки материалов.

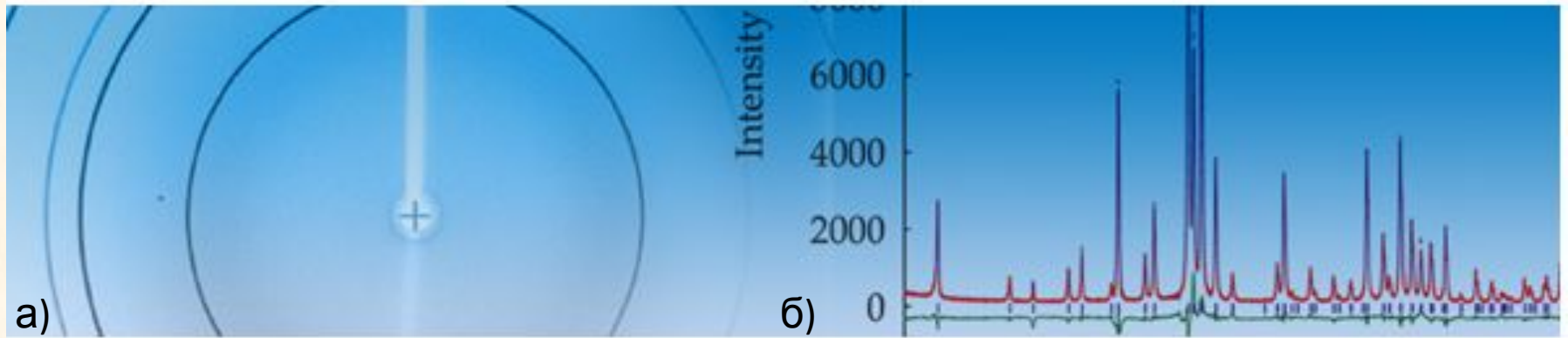
Появление материалов с качественно новыми свойствами возможно благодаря развитию технологии их производства. Современные достижения теории позволяют предсказать существование новых структур и новых свойств, а используемая для анализа материалов аппаратура может оценить степень реализации этих предсказаний.

1.2. Конструкционные материалы

Конструкционными называются материалы, которые применяют для изготовления деталей машин, приборов и



См. слайд ниже



Получающиеся изображения дифракции рентгеновских лучей на фотопленке (а) и бумажной ленте (б).

Картины получаются в результате рассеяния рентгеновских лучей поликристаллом. Даже при небольшом изменении расположения атомов в кристаллической решетке вид данных картин существенно меняется. Это дает возможность судить о изменении расположении атомов в результате каких-либо обработок.

строительных конструкций. Конструкционные материалы можно разделить на две обширные группы:

- металлические материалы;
- неметаллические материалы.

Металлические конструкционные материалы – это черные металлы, цветные металлы и сплавы.

Черные металлы имеют темно-серый цвет, большую плотность, высокую температуру плавления, относительно высокую твердость и во многих случаях обладают полиморфизмом. Наиболее типичными в этой группе являются железо, его сплавы – сталь, чугун, а также ферросплавы.

Техническое железо (с минимальным содержанием углерода и других примесей) производят в небольших количествах для нужд электротехники и др.

→ Ферросплавы, например ферросилиций (до 2,5 % C, 9–13 % Si, основа – железо) и др., применяют при выплавке стали. (с добавками Cr, Si, Mn, Ti и др.)

Сталь – основа современной техники; это обобщенное название очень большой группы железоуглеродистых сплавов (до 2,14 % C).

Чугун (известен еще до новой эры) – наиболее распространенный литейный сплав (до 6,67 % C). С XIII–XIV вв. чугун – основной исходный материал для выплавки стали.

Цветные (нежелезные) металлы – все остальные металлы и сплавы, кроме черных. В настоящее время используют около 65 цветных металлов и их сплавов. Они широко применяются в машино- и приборостроении, а в некоторых областях техники имеют особо важное значение.

Цветные металлы подразделяют на:

легкие металлы – бериллий, магний, алюминий, обладающие малой плотностью;

благородные металлы – серебро, золото, металлы платиновой группы; к ним может быть отнесена и «поблагородная» медь. Обладают высокой устойчивостью против коррозии;



по массе



легкоплавкие металлы — цинк, кадмий, ртуть, олово, свинец, висмут, сурьма и др.;

тугоплавкие металлы — металлы, температура плавления которых выше, чем железа (то есть выше 1539 °С). Гафний, рутений, осмий, рений — элементы весьма редкие и рассеянные в земной коре. Цирконий, хром и ванадий — достаточно доступные металлы, имеющие относительно высокую температуру плавления. Наиболее тугоплавки вольфрам, молибден, ниобий, тантал.

По строению электронных оболочек металлы принято разделять на нормальные и переходные.

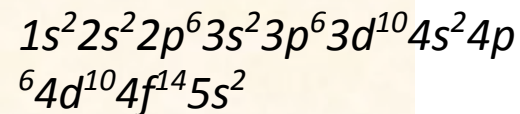
У нормальных металлов внутренние электронные оболочки (уровни) полностью заполнены. К таким металлам относятся Na, Sn, Mg, Al, Pb и др. У переходных металлов внутренние p- и d-оболочки недостроены. Наиболее характерные представители Ni, Co, Mo, Mn, Cr, V, Nb, Zr, Ti, Fe.

Производство стали примерно в двадцать раз превышает общее производство всех цветных металлов и сплавов; 80–85 % чугуна используют для выплавки стали.

К неметаллическим конструкционным материалам относятся:

- — органические и неорганические полимерные материалы;
- — пластмассы;
- — композиционные материалы;
- — каучуки и резины;
- — лакокрасочные материалы;
- — клеи и герметики;
- — керамика;
- — стекло;
- — бетон;
- — графит;
- — дерево;
- другие материалы.

Такие их свойства, как достаточная прочность, жесткость и эластичность при малой плотности, светопрозрачность, химическая стойкость, диэлектрические и другие свойства, час-



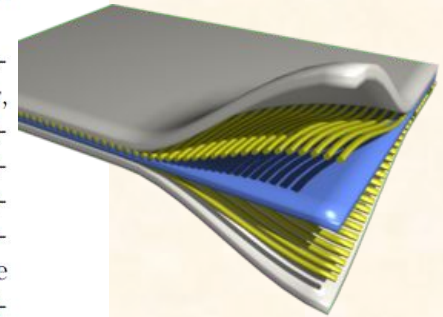
то делают эти материалы незаменимыми. Также следует отметить их технологичность и эффективность при использовании. Неметаллические конструкционные материалы находят все большее применение в различных областях машиностроения. Основой неметаллических материалов являются полимеры, главным образом синтетические.

Основу современной техники составляют металлы и металлические сплавы. Правильный выбор конструкционных материалов для деталей машин, механизмов и конструкций обеспечивает снижение их массы и габаритов, повышение их эксплуатационной надежности и долговечности. Развитие ядерной, ракетной, космической и других новейших областей техники во многом зависит от наличия современных конструкционных материалов.

Громадное, все увеличивающееся производство и потребление металлов — одна из характерных особенностей нашего времени. Несмотря на открытие и массовое применение значительного числа новых неметаллических материалов, роль металлов все более возрастает.

К ряду особенно прогрессивных конструкционных материалов, обуславливающих высокий экономический эффект, относятся композиционные материалы. Современные технологии позволяют получать композиты с заданными механическими свойствами, сочетающими малую плотность с высокой прочностью, жесткостью, ударостойкостью и долговечностью. К тому же этим материалам можно придать нужные электрические, магнитные, теплофизические и другие свойства.

Материаловедение и технология материалов не только позволяют удовлетворять потребность экономики в материалах. Они также открывают обществу возможности и пути решения таких насущных проблем, как истощение природных ресурсов и поддержание высоких темпов экономического развития. Производительность труда и структура производительных сил также в значительной степени зависят от прогресса в этой области.



Глава 2

КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ
ТВЕРДЫХ ТЕЛ2.1. Кристаллы

Различают два вида твердых тел: кристаллические и аморфные. Примером кристаллического тела является каменная (или поваренная) соль. Типичный пример аморфного тела — обыкновенное стекло. У аморфного тела отсутствует определенная температура плавления. В этом состоит одно из основных его отличий от кристаллического. Вместо фиксированной температуры плавления у аморфного тела наблюдается более или менее растянутый интервал размягчения, в котором оно переходит из твердого в жидкое состояние.

Кристаллы — это вещества, в которых составляющие их частицы (то есть атомы, ионы, молекулы, группы атомов) расположены правильными, симметричными, периодически повторяющимися рядами, сетками, решетками. Кристаллы растут из паров, растворов, расплавов и вырастают в виде на удивление правильных многогранников. В земле вырастают кристаллы природных минералов. На заводах и в лабораториях выращивают синтетические кристаллы.

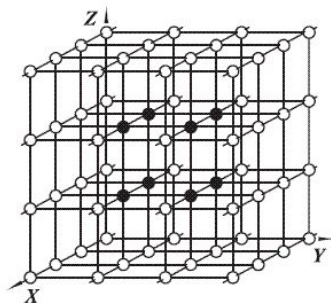


Рис. 2.1. Кристаллическая решетка

Всякий кристалл состоит из отдельных атомов одного или нескольких видов. Совокупность атомов образует то, что называется кристаллической решеткой (рис. 2.1). Эта строгая пространственная периодичность в структуре кристалла — характерная его черта. Силы связи между атомами заставляют частицы в кристалле собираться в кристал-



лические решетки и вырастать в виде многогранников. И характерна для кристалла не сама многогранная форма, не результат роста, а способность расти в такой форме; эта способность не исчезает, даже если кристаллу не удалось принять многогранную форму.

Пространственная решетка, основная роль которой сводится к размножению идентичных точек, является лишь геометрическим построением, помогающим выявить законы симметрии структуры кристалла.

Решетку можно описать с помощью периодически повторяющегося в пространстве элементарного параллелепипеда — элементарной ячейки. Наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла, называется элементарной кристаллической ячейкой. На рис. 2.1 она выделена жирным.

2.2. Типы связей

Природа сил, удерживающих ионы, атомы или молекулы в определенных местах кристаллической решетки, определяет строение кристалла и его свойства. Характер связи, возникающей между элементарными частицами в кристалле, формируется электронным строением атомов, вступающих во взаимодействие. Элементарные частицы в кристалле сближаются на расстояние, которое обеспечивает кристаллу наибольшую термодинамическую стабильность. Силы притяжения возникают благодаря взаимодействию электронов с положительно заряженным ядром собственного атома, а также с ядрами соседних атомов. Силы отталкивания возникают в результате взаимодействия положительных ядер соседних атомов при их сближении (рис. 2.2).

Уравновешивание сил происходит при сближении элементарных частиц на расстояние R_0 . Сближению соответствует минимум энергии, что делает кристалл термодинамически устойчивым.

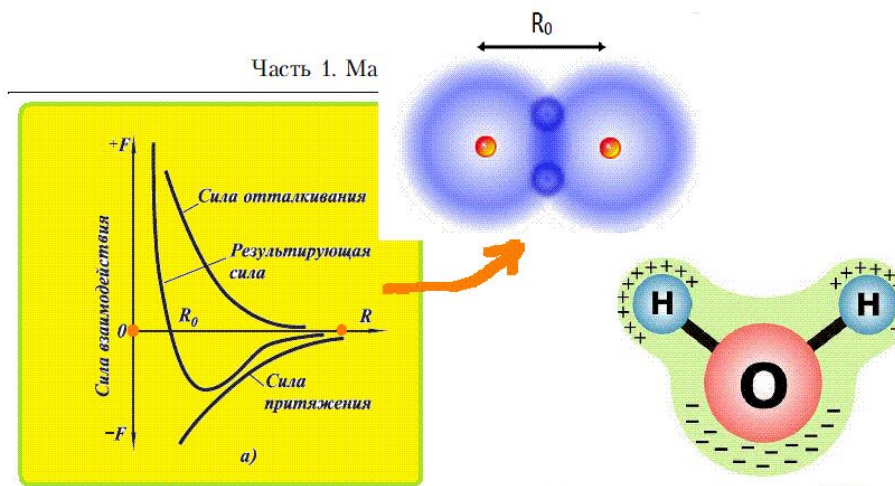


Рис. 2.2. Силы взаимодействия двух атомов (а)

Все кристаллы по характеру связи подразделяют на ковалентные, ионные, металлические, силы Ван-дер-Ваальса.

Ковалентная связь. Такая связь встречается в органических молекулах и керамике, когда атомы совместно владеют парой электронов. В случае ковалентной связи предполагается, что электроны находятся «в общем пользовании» или «распределены» между двумя ядрами, участвующими в образовании связи.

Ионная связь. Если взаимодействие двух нейтральных атомов сопровождается истинным переносом электрона от одного атома к другому, то говорят, что связь в образовавшейся молекуле ионная или электровалентная. Такая связь встречается между положительно и отрицательно заряженными элементами, или ионами.

Если ковалентная связь является направленной, то ионные силы стремятся равномерно распределяться вокруг элементов.

Металлическая связь. Такая связь возникает в металлах и их сплавах, когда не образуются химические соединения. В металлическом кристалле валентные энергетические зоны атомов перекрываются, образуя общую зону с подуровнями. Это дает возможность валентным электронам свободно перемещаться в пределах этой зоны от атома к атому. Происходит

обобществление валентных электронов в объеме всего кристалла. Валентные электроны в металле нельзя считать потерянными или приобретенными атомами. Они обобществлены атомами в объеме всего кристалла, в отличие от ковалентных кристаллов, в которых такое обобществление ограничено одной группой атомов. Металлическая связь ненаправленная, поэтому каждый атом стремится притянуть к себе как можно больше соседних атомов. Следствием этого является большая компактность кристаллических структур металлов.

Металлическая связь образуется относительно легко и легко разрушается, она слабее ковалентной связи.

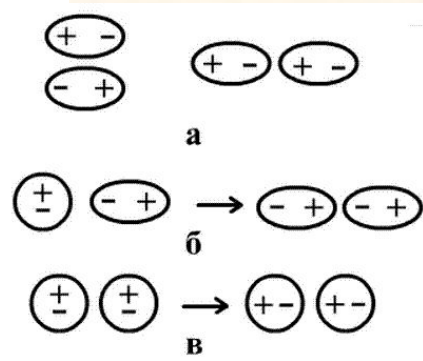
Электронное облако внутри решетки легко привести в движение с помощью электрического поля; следовательно, металл — хороший проводник электричества.

Большая тепловая проводимость металлов обеспечивается наличием этого облака электронов. Если часть металла нагрета, то кинетическая энергия электронов в этой области возрастает. Электроны распространяются по всему металлу, вызывая таким образом рост температуры во всей решетке.

Силы Ван-дер-Ваальса. Малые локальные изменения заряда могут привести к слабым связям между молекулами. Они могут возникать между любыми элементарными частицами (ионами, атомами, молекулами).

Силы Ван-дер-Ваальса не имеют направленного характера, так как мгновенный диполь образуется с каждым из соседних атомов. В результате атомы, стремясь увеличить число соседей в кристаллической решетке, укладываются наиболее компактным образом.

Энергия связи сил Ван-дер-Ваальса невелика, поэтому молекулярные кристаллы имеют низкую температуру плавления и испарения.



2.3. Виды кристаллов

Кристаллическое вещество вообще является плотнупакованным агрегатом из атомов и ионов, так как благодаря ван-

дер-ваальсовым, кулоновским и другим взаимодействиям наиболее стабильными являются структуры, в которых межатомные расстояния имеют минимальные возможные значения.

Металлы имеют преимущественно три типа ячеек:

1. Объемно-центрированная кубическая структура (ОЦК), показанная на рис. 2.3, содержит атом в каждой вершине единичной ячейки, один атом находится в центре куба.

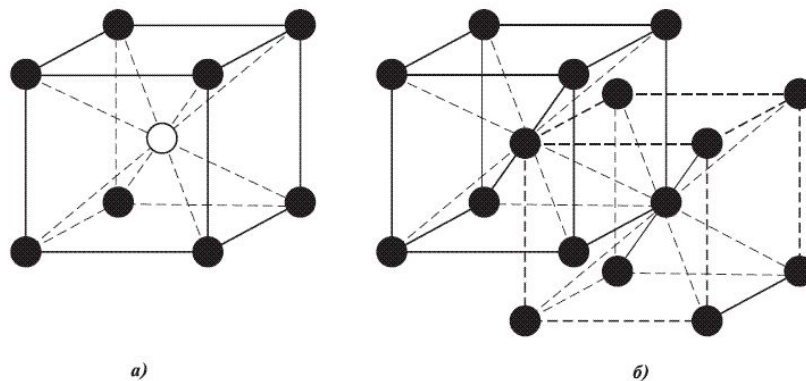


Рис. 2.3. Объемно-центрированная кубическая структура: *а* – единичная ячейка; *б* – кристаллическая решетка

2. Гранецентрированная кубическая структура (ГЦК), представленная на рис. 2.4, содержит атом в каждой вершине куба и один атом в центре каждой грани куба; атом в центре объема отсутствует. Это плотнупакованная кубическая структура.

3. Плотнупакованная гексагональная структура (ГПУ) показана на рис. 2.5. Каждый атом в слое находится непосредственно в верхнем и нижнем промежутках трех атомов в соседних слоях. Также каждый атом соприкасается с шестью атомами в нижнем слое, тремя атомами сверху и тремя атомами снизу.

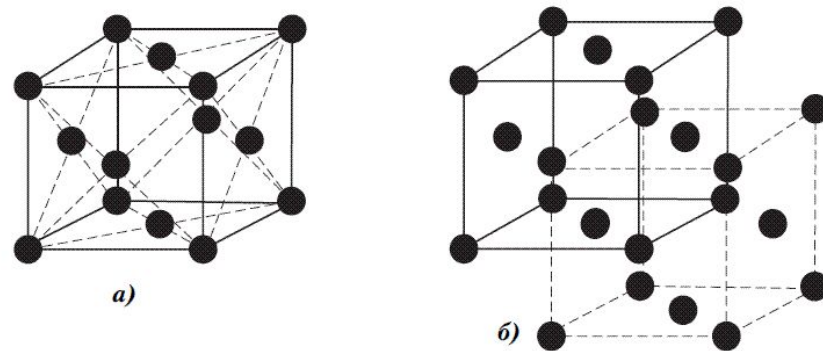


Рис. 2.4. Гранецентрированная кубическая структура: *a* – единичная ячейка; *б* – кристаллическая решетка

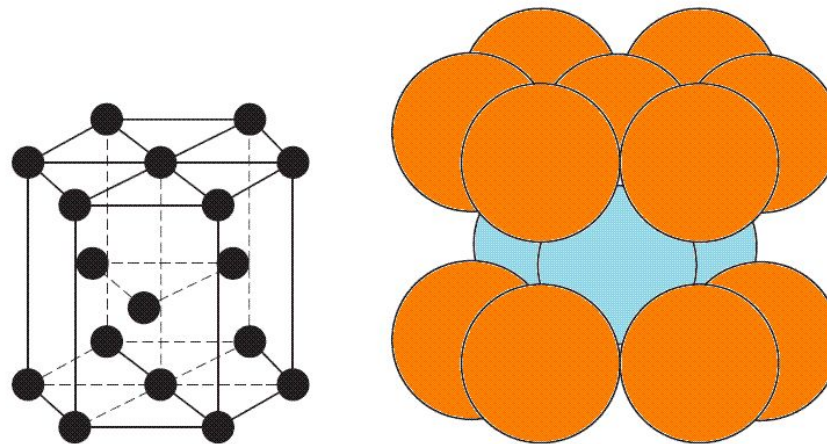


Рис. 2.5. Плотнoупакованная гексагональная структура

2.4. Анизотропия кристаллов

Плотность расположения атомов по различным плоскостям неодинакова.

Вследствие неодинаковой плотности атомов в различных плоскостях и направлениях решетки многие свойства (химические, физические, механические) каждого кристалла зависят от направления вырезки образца по отношению к направлениям в решетке. Подобная неодинаковость свойств монокристалла в разных кристаллографических направлениях называется анизотропией.

Кристалл — тело анизотропное, в отличие от аморфных тел (стекло, пластмасса и др.), свойства которых не зависят от направлений в решетке.

Технические металлы являются поликристаллами, то есть состоят из большого количества анизотропных кристаллов. В большинстве случаев они статистически неупорядоченно ориентированы один по отношению к другому; поэтому во всех направлениях свойства более или менее одинаковы, то есть поликристаллическое тело является псевдоизотропным.

2.5. Характеристики кристаллических структур

Дополнительными характеристиками кристаллической решетки, вытекающими из ее геометрии и отражающими плотность упаковки элементарных частиц в кристалле, являются координационное число и коэффициент компактности.

Координационное число — это число ближайших атомов в регулярно повторяющейся структуре кристалла (рис. 2.6). В табл. 2.1 (см. с. 28) приведены их значения.

Коэффициент компактности — это отношение объема атомов в элементарной ячейке ко всему ее объему. Атомы рассматриваются как «твердые шарики» радиуса r .

Примеры:

а) простая кубическая ячейка с постоянной решетки a :
коэффициент компактности

$$\eta = \frac{\text{объем атомов}}{\text{объем ячейки}} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{(2r)^3} = 0,52;$$

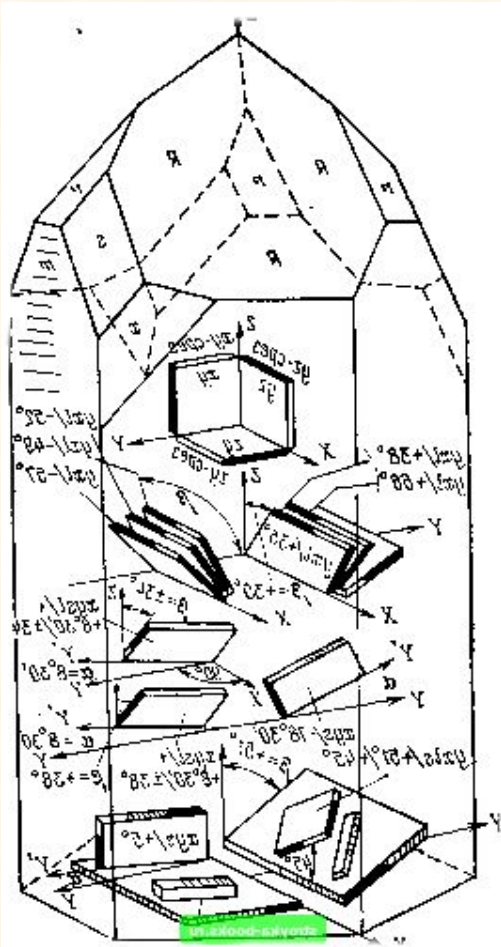
б) объемно-центрированный куб:



Тепловое расширение.
После нагрева шара он не проходит через кольцо. При этом шар расширяется равномерно во все стороны.



Вид поликристаллического образца под микроскопом.



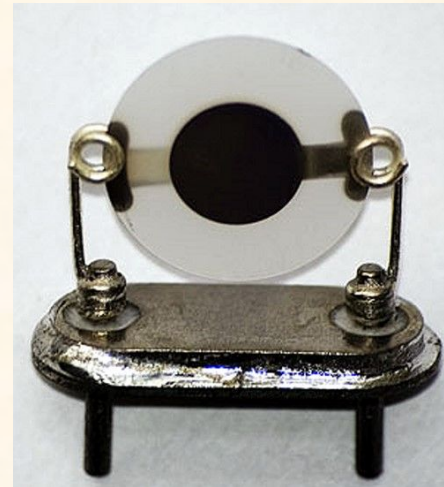
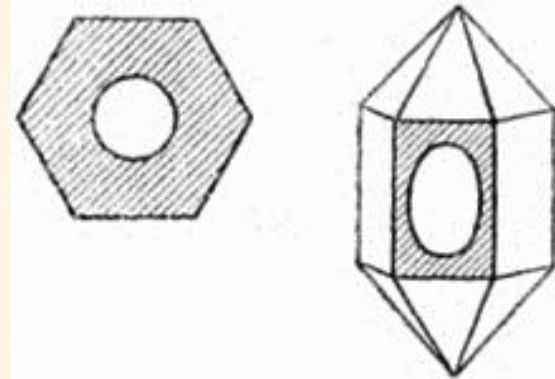
На пластинку, кольцо или брусок, вырезанные из кристалла кварца определённым образом, нанесены 2 и более электродов — проводящие полоски.

Пластинка закреплена и имеет собственную резонансную частоту механических колебаний.

При подаче напряжения на электроды благодаря пьезоэлектрическому эффекту происходит изгибание, сжатие или сдвиг в зависимости от того, каким образом вырезан кусок кристалла.

Однако колеблющаяся пластинка в результате того же пьезоэлектрического эффекта создаёт во внешней цепи противо-ЭДС, что можно рассматривать как явление, эквивалентное работе катушки индуктивности в колебательном контуре.

Если частота подаваемого напряжения равна или близка к частоте собственных механических колебаний пластинки, затраты энергии на поддержание колебаний пластинки оказываются намного ниже, нежели при большом отличии частоты. Это тоже соответствует поведению колебательного контура.



Кварцевый резонатор в кристаллодержателе

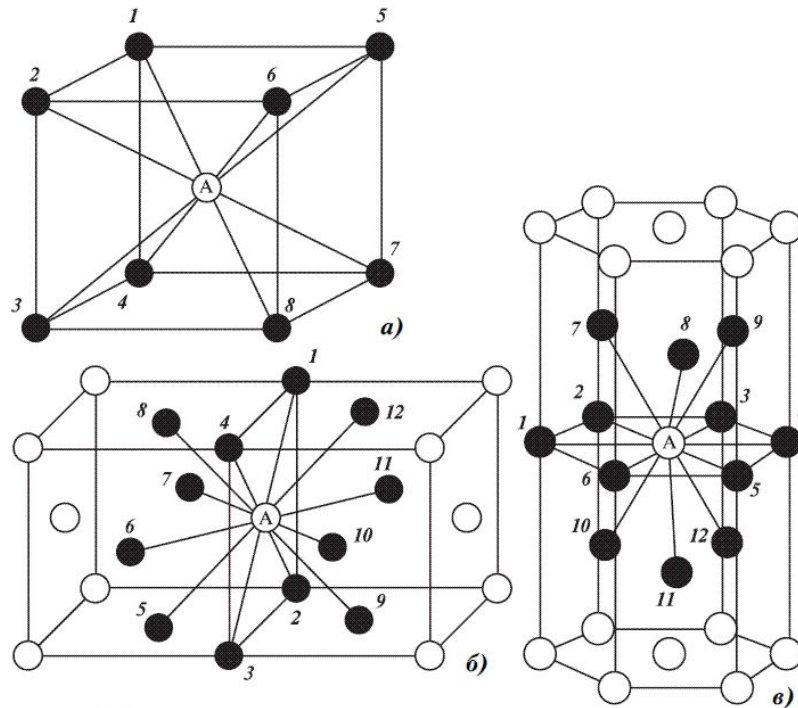


Рис. 2.6. Координационное число в различных кристаллических решетках для атома *A*: *a* – объемно-центрированная кубическая (К8);
б – кубическая (К12); *в* – гексагональная плотноупакованная (Г12)

постоянная решетки *a* связана с атомным радиусом *r* соотношением

$$a = 4r\sqrt{3};$$

коэффициент компактности

$$\eta = \frac{2\frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = \frac{2\frac{4}{3}\pi r^3}{(4r\sqrt{3})^3} = 0,68;$$

в) гранцентрированный куб:

$$a = \frac{4r}{\sqrt{2}};$$

тогда коэффициент компактности $\eta = 0,74$.

Число атомов в элементарной ячейке свидетельствует о плотности атомов в ячейке. Для кубической структуры каждый угловой атом участвует в восьми элементарных ячейках и поэтому может рассматриваться как одна восьмая ее часть.

Значения этих параметров для различных кристаллических структур даны в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Сравнение параметров кристаллических решеток

Структура	Координационное число (К)	Число атомов в элементарной ячейке	Коэффициент компактности (η)
<u>Простой куб</u>	6	1	0,52
<u>ОЦК</u>	8	$8/8 + 1 = 2$	0,68
<u>ГЦК</u>	12	$8/8 + 6/2 = 4$	0,74
<u>Простая гексагональная</u>	8	$12/6 + 2/2 = 3$	–
<u>ГПУ</u>	12	$12/6 + 2/2 = 6$	0,74

Кристаллическая структура некоторых металлов приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Структура металлов

Структура	Металлы	Примечание
ОЦК	<u>Nb, Ta, W, Cr, Mo, V</u>	<u>Хрупкие металлы. Тугоплавки, имеют высокую температуру плавления и высокую растворимость для малых атомов</u>
ГЦК	<u>Al, Cu, Pb, Ag, Ni, Au, Pt</u>	Пластичные металлы
ГПУ	<u>Zn, Mg, Cd</u>	–

2.6. Полиморфизм (аллотропия)

Существование одного металла (вещества) в нескольких кристаллических формах называется полиморфизмом или аллотропией. Различные кристаллические формы одного вещества называются полиморфными или аллотропическими модификациями.

Небольшие изменения давления, которые могут возникать в практике, обычно не приводят к полиморфным превращениям. Поэтому для практического материаловедения важна главным образом температурная аллотропия.

Аллотропические формы обозначают греческими буквами α , β , γ и т. д., которые в виде индексов добавляют к символу, обозначающему элемент. Низкотемпературную модификацию обозначают буквой α , следующую — β и т. д.

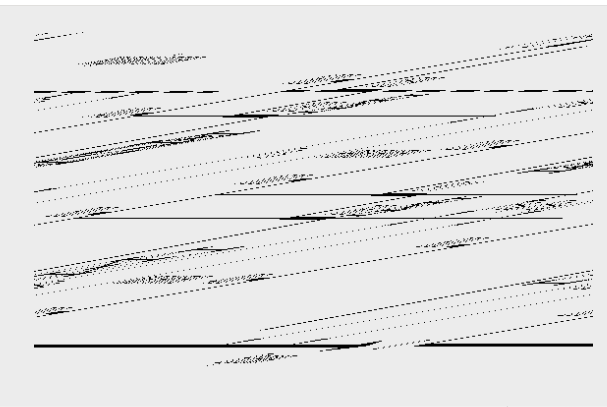
Преобразование одной аллотропической формы в другую в чистом металле происходит при постоянной температуре и сопровождается поглощением тепла.

На рис. 2.3 показан интервал температур существования этих полиморфных форм некоторых металлов.

Таблица 2.3

Аллотропические формы металлов

	Аллотропическая форма	Интервал температур устойчивого состояния, °C	Кристаллическая решетка
	2	3	4
Fe	α	< 911	Кубическая объемно-центрированная (K8)
	δ	1392–1539	То же
	γ	911–1392	Кубическая гранцентрированная (K12)
Co	α	< 450	Гексагональная (Г12)
	β	450–1480	Кубическая гранцентрированная (K12)
Sn	α	< 18	Решетка алмаза
	β	18–232	Тетрагональная объемно-центрированная



Окончание табл. 2.3

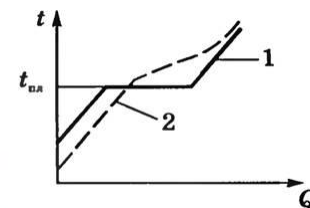
1	2	3	4
Mn	α	< 700	Кубическая сложная многоатомная
	β	700–1079	То же
	γ	1079–1143	Тетрагональная гранцентрированная
	δ	1143–1244	Кубическая объемно-центрированная (К8)
Ti	α	< 882	Гексагональная (Г12)
	β	882–1668	Кубическая объемно-центрированная (К8)
Zr	α	< 867	Гексагональная (Г12)
	β	867–1860	Кубическая объемно-центрированная (К8)
U	α	< 660	Ромбическая
	β	660–770	Тетрагональная
	γ	770–1133	Кубическая объемно-центрированная (К8)



2.7. Аморфные структуры

Аморфные вещества не имеют постоянной температуры плавления, они размягчаются и плавятся при повышении температуры. Это отличает их от кристаллических тел, имеющих постоянную температуру плавления. Аморфные вещества можно рассматривать как материалы с большим числом дефектов, которые определяют их свойства, значительно отличные от свойств других веществ. Слово «аморфный» означает «без формы», и это могут быть газы, жидкости и стекло. Обычными аморфными материалами при комнатной температуре являются вода, нефть, ртуть, стекло. При высокой температуре стекло является жидкостью.

Большинство аморфных материалов обладает ближним порядком. В то же время упаковка молекул без дальнего порядка позволит создать большие плотности — ведь часть молекул может менять свою форму; если разные молекулы деформируются по-разному, то дальний порядок становится невозможным, а плотная упаковка вполне осуществима.



Если форма молекул такова, что образование дальнего порядка приводит к большой доле пустого места, чем при отсутствии его при плотной упаковке, то кристалл не образуется. Такие вещества не кристаллизуются, а медленно густеют, давая аморфные вещества. К аморфным относится большое число органических веществ, построенных из гигантских молекул; таковы многие пластмассы, стекло, кварц (рис. 2.7).

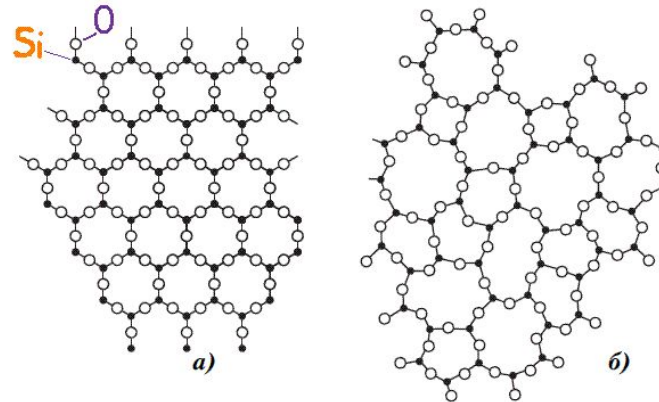


Рис. 2.7. Схема строения кварца. Черные кружки — атомы кремния, белые — кислорода. Рисунок упрощает действительную картину, так как изображает плоскую модель. Аморфный кварц (б) с точки зрения изображенной модели представляет собой «испорченную» решетку кристаллического кварца (а)

2.8. Структура неметаллических твердых тел

Ионные кристаллы подобны металлическим кристаллам, но у них в решетке вместо атомов расположены ионы. Каждый ион расположен в окружении нескольких ионов противоположного знака. В решетке NaCl, являющейся гранецентрированным кубом, один ион расположен в узле решетки, а другие ионы (противоположного знака) — на половине ребра элементарной ячейки. Молекулу NaCl представляет ионный кристалл (рис. 2.8). Однако имеются некоторые ионные кристаллы, в узлах решетки которых — молекулы (оба иона).

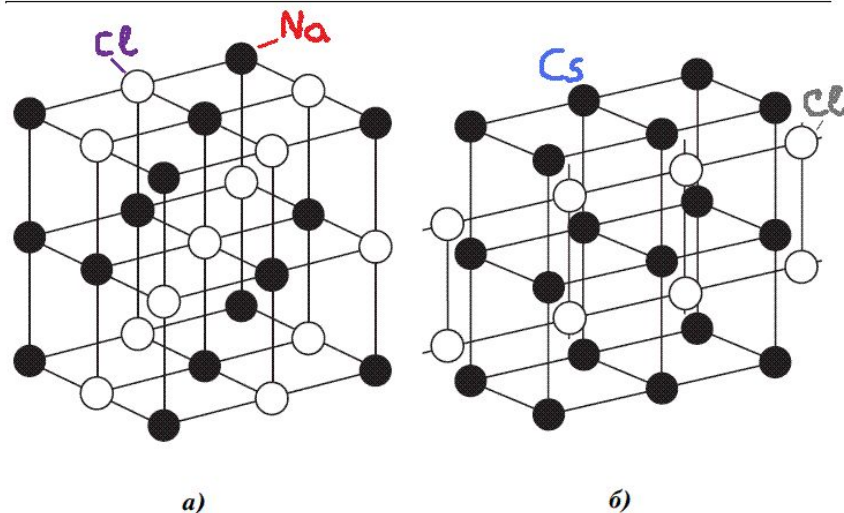
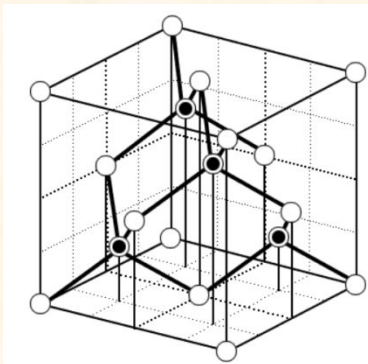


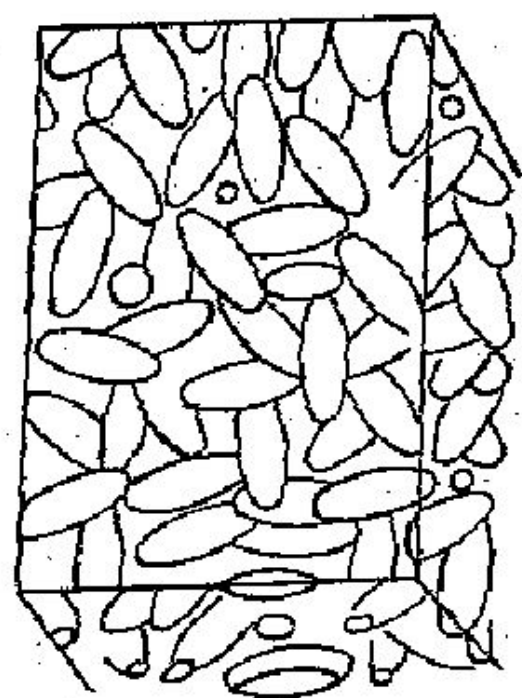
Рис. 2.8. Структура ионных кристаллов: *a* – структура типа хлорида натрия: черные шары обозначают один тип ионов, белые – второй. По отдельности черные и белые шары образуют две вставленные друг в друга ГЦК-решетки; *б* – структура типа хлорида цезия: черные шары образуют две вставленные друг в друга простые кубические решетки

Ковалентные кристаллы, основанные на пространственных решетках, были описаны выше. Здесь между соседними атомами имеется очень жесткая ковалентная связь. Прочность связи вызвана распределением валентных электронов. Ковалентные связи являются типичными для керамических материалов.

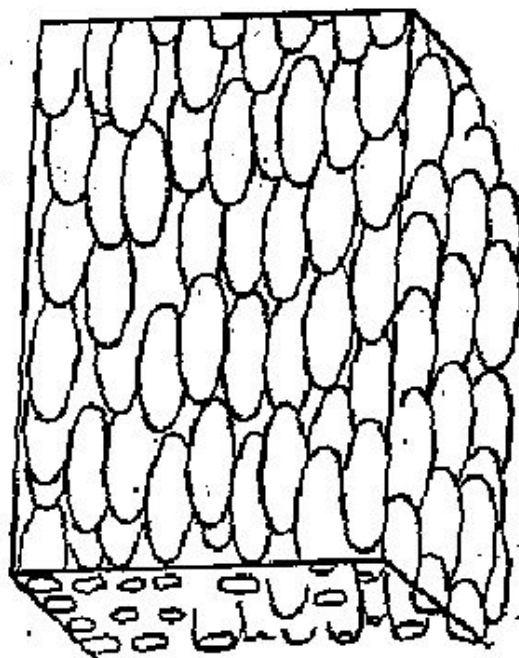
Полимеры состоят из длинных цепей повторяющихся органических молекул. Атомы внутри повторяющихся молекулярных цепей связаны сильной ковалентной связью. Однако связь между цепями вызвана слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Некоторые полимеры бывают кристаллическими, хотя этот термин здесь понимается не в обычном смысле. Его используют для описания условий расположения длинноцепных молекул параллельно друг другу, таким образом образуется регулярная структура в некоторой области объема полимера. Когда цепи запутанны, они проявляют аморфность. Степень кристалличности зависит от расположения цепей.



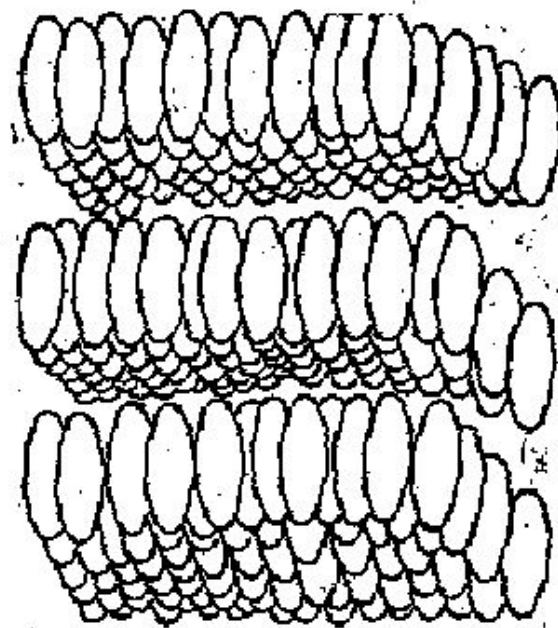
Молекулы могут также сшиваться ковалентными связями.



а



б



в

Рис. 12. Схемы строения:
а — жидкость; б, в — жидких кристаллов; б — одномерных кристаллов; в —
плоских кристаллов

Молекулярная масса полимера является важным свойством, которое можно использовать как показатель прочности материала. Так как не все цепи имеют одинаковую длину, измеряется среднее значение молекулярной массы. Один из способов определения молекулярной массы — измерение скорости истечения расплава полимера через отверстия при стандартных условиях.

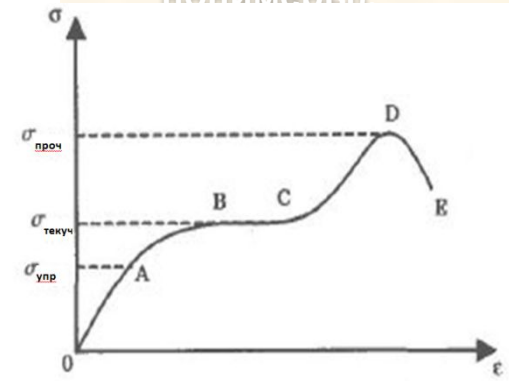
Композиты представляют собой комбинацию двух или более материалов, обычно формируемую покрытием, различными добавками или ламинированием. Свойства композитов очень различны в зависимости от составляющих их материалов. Примерами являются стеклопласты, керамические материалы.

2.9. Прочность и структура материалов

Внешние нагрузки могут разрушить атомные связи. Если эти связи очень прочные, тогда происходит раскалывание кристалла, а атомные связи будут обрываться вдоль некоторых плоскостей. Это может случиться в хрупких металлах и сплавах, керамиках, обладающих ковалентной связью, а также в кристаллах с ионной связью. В металлах связи таковы, что при комнатных температурах наблюдается текучесть, которая происходит в результате скольжения атомов и обуславливает пластическую деформацию металлов. Если это скольжение будет ограничено, например, легированием, холодной обработкой или закалкой, тогда прочность металлов будет увеличиваться.

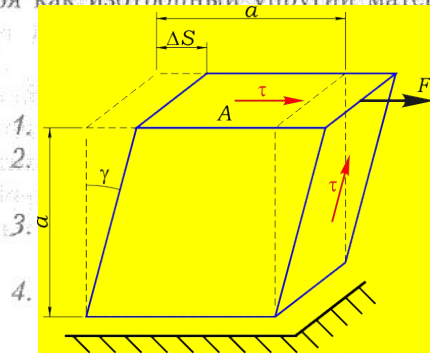
Упругие свойства материалов проявляются при условиях, когда не наблюдается остаточной деформации. Модуль упругости (модуль Юнга) кристалла является мерой силы, требуемой для смещения атомов кристалла из их нормального равновесного состояния. А это зависит от сил связи между атомами. Модуль Юнга и модуль сдвига аморфных материалов одинаковы (изотропия упругости), каким бы ни было направление приложимого напряжения. Однако кубические

Стеклопластики — вид композиционных материалов — пластические материалы, состоящие из стекловолоконного наполнителя (стеклянное волокно, волокно из кварца и др.) и связующего вещества (термореактивные и термопластичные полимеры)



$$\sigma = E \varepsilon$$

кристаллы являются упругоанизотропными, и их свойства зависят от направления нагрузки. В поликристаллических металлах упругие постоянные усредняются вследствие случайной ориентации зерен в пространстве. Поэтому металл ведет себя как изотропный упругий материал.



ПРОСЫ

1. ...чают тверд
2. ...мами и моле
3. ...аллов и как
4. ...ся от кристаллических?

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

Гамма это приблизительно дельта S деленная на

а ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

Дефекты кристаллов являются важным признаком кристаллов, так как определяют их механические свойства, такие, как сопротивление к пластической деформации, ковкость, предел текучести и напряжение разрушения. Дефекты также вызывают снижение прочности материалов. В совершенном кристалле атомы располагаются регулярно. В действительных реальных кристаллах присутствуют дефекты, которые существенно изменяют как механические, так и технологические свойства металлов.

Обычно металл состоит из скопления большого числа маленьких кристаллов неправильной формы, называемых зернами. Кристаллические решетки в отдельных зернах ориентированы относительно друг друга случайным образом. В некоторых случаях, например при холодной прокатке, наблюдается преимущественная ориентация зерен — текстура (рис. 3.1 и 3.2). Поверхности раздела зерен называются границами зерен. Такой

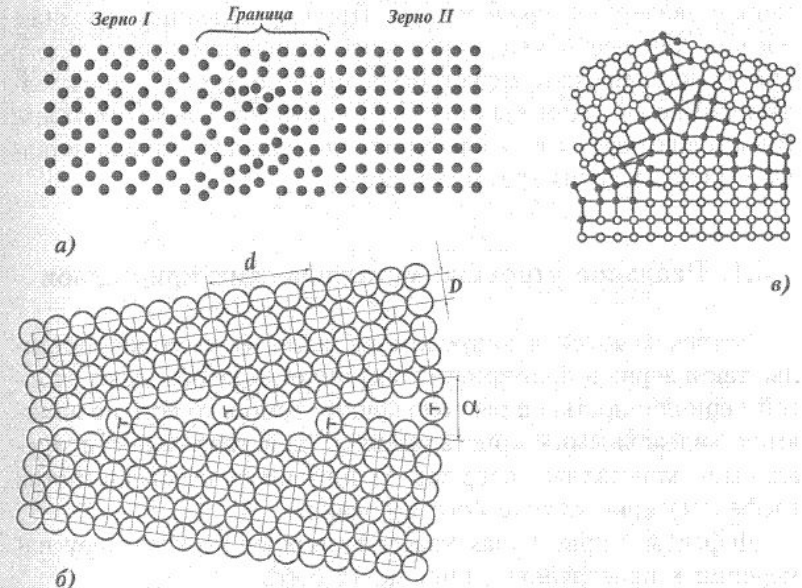


Рис. 3.1. Схема строения границы между зернами: а — большевугловая граница; б — границы между блоками (маловугловые границы); α — угол разориентировки соседних блоков; в — схема поликристаллического строения

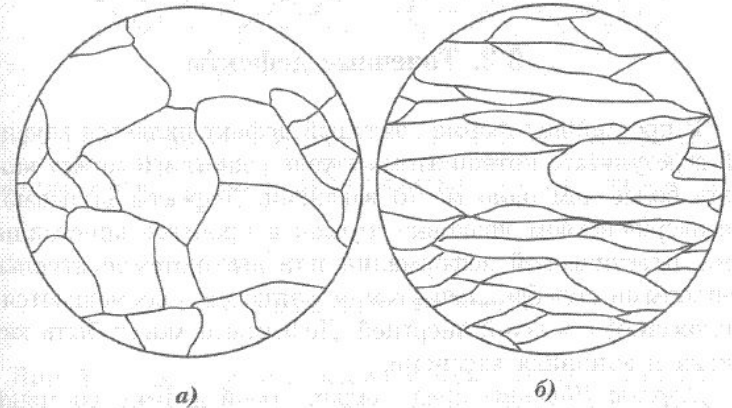


Рис. 3.2. Влияние пластической деформации на микроструктуру металла (схема) а — до деформации; б — после деформации

металл является поликристаллом. При определенных условиях, обычно при очень медленном контролируемом отводе тепла, при кристаллизации может быть получен металл, представляющий собой один кристалл; его называют монокристаллом. В настоящее время в лабораториях выращивают монокристаллы в несколько сот граммов и более.



ОМЕГА 200
Установка
предназначена для
выращивания
монокристаллов
сапфира (Al₂O₃)
весом до 38 кг,
диаметром до 200
мм и до 300 мм
длиной. Метод
Киропулоса (ГОИ).

3.1. Реальное строение металлических кристаллов

Встречающиеся в природе кристаллы (как монокристаллы, так и зерна в поликристаллах) никогда не обладают строгой периодичностью в расположении атомов, то есть не являются «идеальными» кристаллами. В действительности «реальные» кристаллы содержат те или иные несовершенства (дефекты) кристаллического строения.

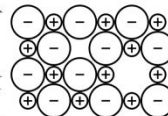
Дефекты в кристаллах классифицируют по характеру измерения в пространстве. Они могут быть:

- точечными (нульмерными);
- линейными (одномерными);
- поверхностными (двухмерными);
- объемными (трехмерными).

3.2. Точечные дефекты

В простейшей форме точечный дефект является вакансией в результате потери атома в узле решетки и может включать более чем одно место вакансий. Дефекты вызываются несовершенством упаковки атомов в процессе кристаллизации, пластической деформации или высокотемпературными тепловыми колебаниями атомов, когда они перемещаются из положений с низкой энергией. Дефектами могут быть катионная и анионная вакансии.

Дефект Шоттки представляет собой дефект, состоящий из анионной или катионной вакансии, встречающийся в соединении, которое может сохранять баланс заряда.



Дефект Френкеля возникает, когда атом из равновесного положения в узле решетки переходит в межузлие. Возникает пара «вакансия — межузельный атом».

Основные типы точечных дефектов показаны на рис. 3.3.

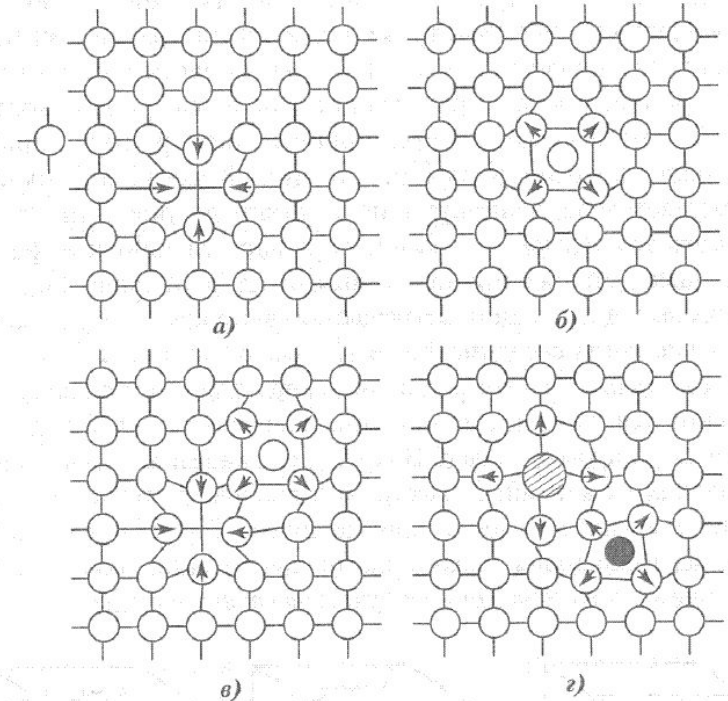


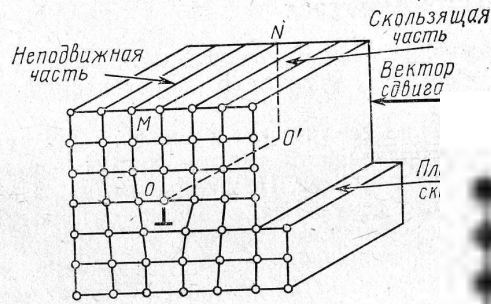
Рис. 3.3. Точечные дефекты в кристалле: а — вакансия; б — дислоцированный атом; в — дефект Френкеля; z — примесные атомы замещения (большой) и внедрения (маленький). Стрелками указаны направления смещения атомов в решетке

3.3. Линейные дефекты

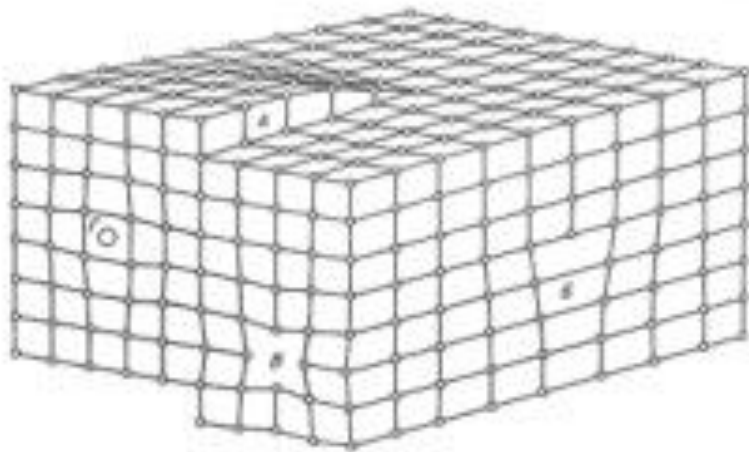
Линейные дефекты характеризуются тем, что их поперечные размеры не превышают нескольких межатомных расстояний, а длина может достигать размера кристалла.

Таковыми дефектами являются вакансии. Возможно существование дислокаций было предложено Френком.

Краевая дислокация в кристаллическом образце (обозначается символом « \perp » — перпендикулярно плоскости рисунка) и винтовая дислокация (обозначается символом « \parallel » — параллельно плоскости рисунка). Эти области создаются в



Краевая дислокация OO' , возникшая в результате сдвига



каци
фект
ван
слон
ааетс
доба
кени
ая р
аает
тип

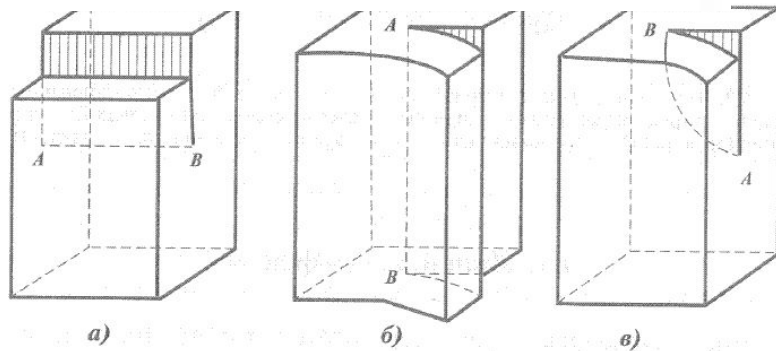
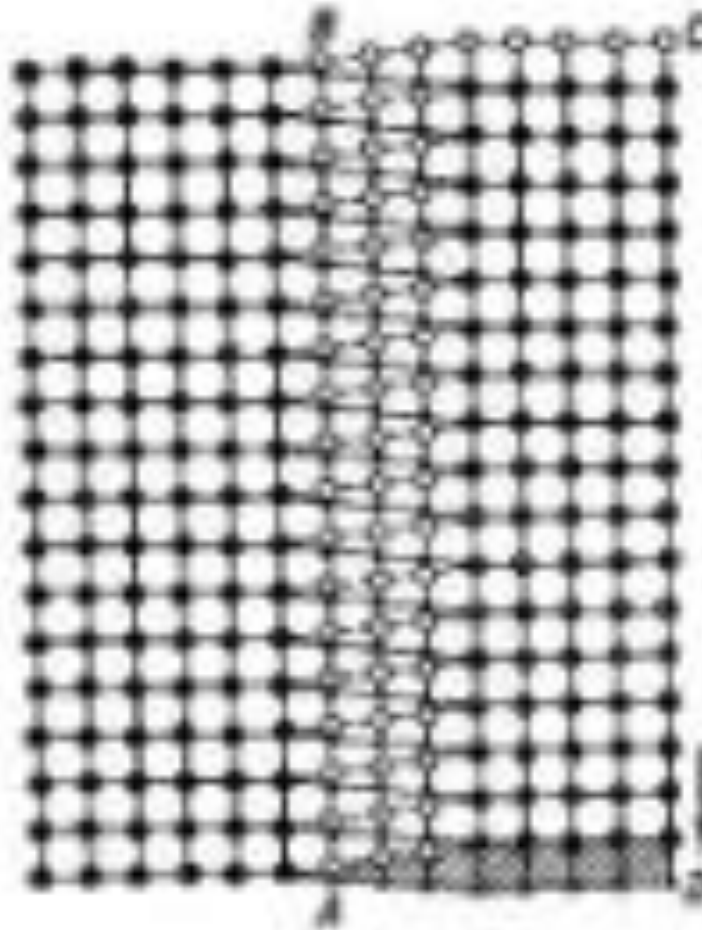
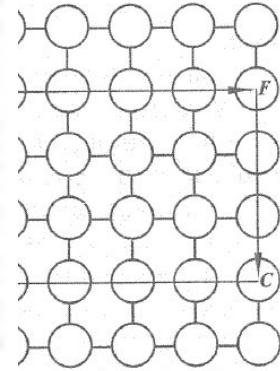


Рис. 3.4. Краевая (а), винтовая (б) и смешанная (в) дислокации в кристалле. Смешанная дислокация в точке А имеет краевую ориентацию, в точке В — винтовую

Чтобы оценить степень искаженности решетки, вызванной дислокацией, следует сравнить несовершенный кристалл с идеальным.



идеальным кристаллом, представляющий собой идеальную решетку, условно выделенной (область обхода) в кристалле.



б)

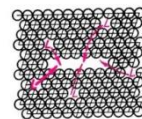
краевой дислокацией (а)

направление

держателя винтовую дислокацию он параллелен ей. сколько дислокаций,

то величина его соответствует геометрической сумме векторов Бюргера отдельных дислокаций. Квадрат вектора Бюргера характеризует энергию дислокаций и силы их взаимодействия.

Дислокации образуются в процессе кристаллизации металлов при «захлопывании» группы вакансий, а также в процессе пластической деформации и фазовых превращений.



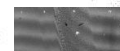
3.4. Поверхностные, или плоские, дефекты

Под поверхностными (плоскими) дефектами понимают такие нарушения в кристаллической решетке, которые обладают большей протяженностью в двух измерениях и протяженностью лишь в несколько межатомных расстояний — в третьем измерении.

Поверхность может быть кривой!

Такие кристаллические несовершенства могут встречаться в различных физических ситуациях:

- на свободной поверхности между газами и твердыми телами;
- на межфазных границах, когда изменения в структуре и химическом составе встречаются в межфазной поверхности;
- на границах доменов на межфазных поверхностях между областями, содержащими одинаковые атомы;
- на границах зерен;
- на двойниковых границах;
- на локальных нарушениях расположения плотноупакованных поверхностей.



Атомы, которые составляют внешнюю поверхность кристаллической структуры, обладают большой энергией, чем внутренние атомы, поскольку внешние атомы не полностью окружены другими атомами. Примером такого состояния является сферическая форма жидких капель, обладающих минимумом поверхностной энергии в единицу объема.

Форма зерен определяется окружающими зернами. Атомы в зернах имеют одинаковую упаковку, которая определяется устройством решетки. На границе между двумя соседними зернами атомы не могут располагаться совершенным образом для обеих кристаллических решеток. Существует переходная зона между двумя зернами, где структура отличается от структуры зерен.

3.5. Объемные дефекты

Объемными дефектами являются:

- литейные дефекты, например усадочные раковины или газовые полости;
- дефектыковки или обработки, например трещины;



— дефекты сварки или соединений, например трещины, газовые полости, шлаковые включения, области коррозии.

Размеры различных типов структурных дефектов важны при рассмотрении их влияния на материалы.



3.6. Влияние облучения на свойства металлов

Металлы, из которых изготовлены реакторы, подвергаются облучению различными элементарными частицами, образующимися при работе реактора. Эти частицы, особенно быстрые нейтроны, глубоко проникают внутрь металла и вызывают остаточное изменение его свойств.

Изменение свойств металла обусловлено тем, что внедряющиеся в его кристаллическую решетку элементарные частицы, прежде всего нейтроны, выбивают из регулярных мест в решетке атомы, которые, в свою очередь, могут выбивать другие атомы, попадающиеся на их пути. Теория показывает, что один нейтрон может вывести из равновесного состояния до 300 атомов в алюминии. Такие сильные нарушения в кристаллической решетке создают в ней дефектные места.

Кроме того, дефекты возникают в результате образования термических пиков. Дело в том, что часть энергии нейтронов затрачивается на возбуждение упругих колебаний отдельных групп атомов. Это резко увеличивает температуру в небольшом объеме. Посредством теплопроводности происходит быстрое рассеивание тепла, и металл в этом месте получает локальную закалку, что сильно искажает решетку.

Образование таких дефектов затрудняет перемещение дислокаций и упрочняет металл. В общем, по влиянию на свойства металла ядерное облучение похоже на наклеп.

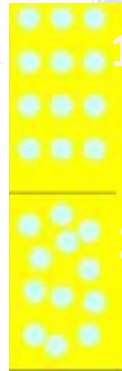
Так, ядерное облучение, увеличивая прочность простых сталей в полтора-два раза, примерно в такой же степени уменьшает их пластичность и вязкость. Эффект ядерного упрочнения металла, подвергнутого предварительно обычным методам упрочнения (наклепу, закалке), меньше, чем в случае неупрочненного, отожженного металла. С повышением температуры эффект ядерного облучения уменьшается, и при температурах выше порога рекристаллизации он практически отсутствует.

Необходимо иметь в виду, что при облучении могут появиться атомы новых элементов в результате деления или захвата нейтрона ядром атома основного металла. При длительном облучении чистый металл может превратиться в сплав вследствие превращения некоторого числа его атомов в другие элементы.

Наконец, в результате нейтронного облучения металл становится радиоактивным и опасным для здоровья человека.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие дефекты встречаются в кристаллических телах?
2. Каковы основные причины возникновения дефектов в металлических кристаллах?
3. Что такое объемные дефекты?
4. Какие дефекты в кристаллической решетке возникают при радиоактивном облучении металлов и как они влияют на их свойства?



Глава 4

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Любое вещество может находиться в трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком, твердом. В чистых металлах при определенных температурах происходит изменение агрегатного состояния: твердое состояние сменяется жидким при температуре плавления, жидкое состояние переходит в газообразное при температуре кипения. Температуры перехода зависят от давления, но при постоянном давлении они вполне определены.

4.1. Энергетические условия процесса кристаллизации

Переход металла из жидкого или парообразного состояния в твердое с образованием кристаллической структуры называется первичной кристаллизацией.

Образование новых кристаллов в твердом кристаллическом веществе называется вторичной кристаллизацией.

Процесс кристаллизации складывается из двух одновременно идущих процессов: зарождения и роста кристаллов. Кристаллы могут зарождаться (самопроизвольная кристаллизация) или расти (несамопроизвольная кристаллизация) на имеющихся готовых центрах кристаллизации.

Самопроизвольная кристаллизация обусловлена стремлением вещества иметь более устойчивое состояние, характеризующееся уменьшением термодинамического потенциала, называемого свободной энергией F:

$$F = U - TS,$$

где U — внутренняя энергия; T — температура; S — энтропия.

С повышением температуры свободная энергия вещества как в твердом, так и в жидком состоянии уменьшается (рис. 4.1).

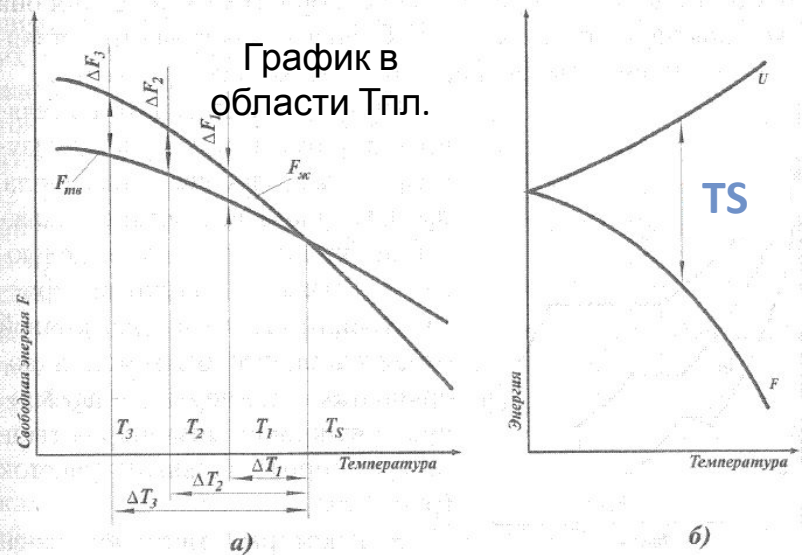


Рис. 4.1. Влияние температуры на свободную энергию жидкой и твердой фаз (а); на внутреннюю и свободную энергии и энтропийный член (б) мономорфного вещества

Температура, при которой свободная энергия в твердом и жидком состояниях равна, называется равновесной кристаллизацией. Кристаллизация происходит в том случае, если $F_{ТВ}$ в твердом состоянии будет меньше $F_{ж}$ в жидком состоянии, то есть при переохлаждении жидкого металла до температуры ниже равновесной.

Плавление — обратный процесс кристаллизации — происходит при перегреве выше равновесной температуры. Разница между реальными температурами плавления и кристаллизации называется температурным гистерезисом.

Температура, при которой практически начинается кристаллизация, называется фактической температурой кристаллизации.

Величиной или степенью переохлаждения называют разность между теоретической и фактической температурами кристаллизации. Обычная степень переохлаждения металлов при кристаллизации в производственных условиях колеблется от 10 до 30 °С; при больших скоростях охлаждения она может достигнуть сотен градусов. Степень перегрева при плавлении металлов обычно невелика (несколько градусов).

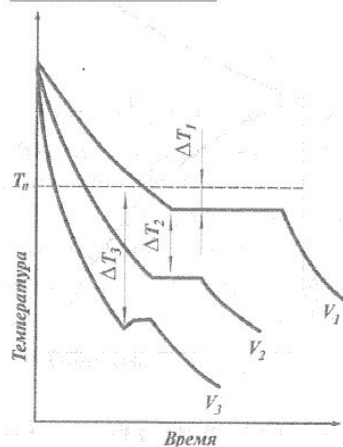


Рис. 4.2. Кривые охлаждения металла при кристаллизации:
 $V_1 < V_2 < V_3$

При кристаллизации выделяется теплота. Когда кристаллизуется чистый элемент, отвод тепла, происходящий вследствие охлаждения, компенсируется выделяющейся скрытой теплотой кристаллизации. Поэтому на кривой охлаждения, изображаемой в координатах «температура—время», процессу кристаллизации соответствует горизонтальный участок (рис. 4.2).

У некоторых металлов из-за большого переохлаждения скрытая теплота плавления выделяется в первый момент кристаллиза-

ции настолько бурно, что температура скачкообразно повышается, приближаясь к теоретической (кривая V_3 , рис. 4.2). Так кристаллизуется, например, сурьма.

Чем больше скорость охлаждения, тем больше величина переохлаждения. Для того чтобы полностью переохлаждать металл в жидком состоянии, требуются большие скорости охлаждения (миллион градусов в секунду). Металл, не имеющий кристаллическую структуру, можно получить, переохладив его за ничтожную долю секунды. Такой металл называется аморфным или металлическим стеклом.

4.2. Механизм процесса кристаллизации

В жидком состоянии атомы вещества вследствие теплового движения перемещаются беспорядочно. В то же время в жидкости имеются сравнительно устойчивые группировки атомов небольшого объема. Эти группировки неустойчивы, распадаются и вновь появляются в разных местах жидкости. В пределах группировки расположение атомов вещества во многом аналогично их расположению в решетке кристалла. При переохлаждении жидкости некоторые из них, наиболее крупные, становятся устойчивыми и способными к росту. Эти устойчивые группировки атомов называются центрами кристаллизации (зародышами).

Процесс кристаллизации начинается с образования кристаллических зародышей (центров кристаллизации) и продолжается в процессе роста их числа и размеров. При переохлаждении сплава ниже температуры $T_{пл}$ во многих участках жидкого сплава образуются кристаллические зародыши, называемые критическими (рис. 4.3). Пока образовавшиеся кристаллы растут свободно, они имеют более или менее правильную геометрическую форму. Однако при столкновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается, так как на этих участках рост граней прекращается. Он продолжается только в тех направлениях, в которых есть свободный доступ для «питающей» жидкости. В результате растущие кристаллы, имеющие сначала геометрически правильную форму, после затвердевания получают неправильную внешнюю форму; они называются кристаллитами (зернами).

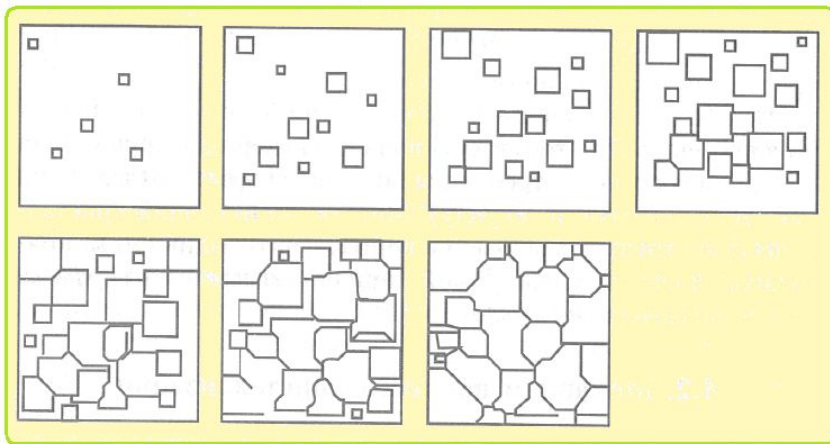


Рис. 4.3. Схема кристаллизации металла

Появление зародышей изменяет свободную энергию. С одной стороны, при переходе жидкости в кристаллическое состояние свободная энергия уменьшается, с другой — она увеличивается вследствие появления поверхности раздела между жидкостью и зародышем.

Превращение произойдет тогда, когда выигрыш в энергии от перехода в более устойчивое состояние будет больше потери энергии, идущей на образование поверхности раздела. Другими словами, свободная энергия системы $\Delta\Phi$ определяется как сумма двух членов, характеризующих поверхность-

$$\Delta\Phi = S\sigma - V\Delta F,$$

где S — поверхность; σ — поверхностное натяжение; V — объем; ΔF — разность свободных энергий жидкого и кристаллического состояний, приходящаяся на единицу объема.

По мере увеличения зародыша (сферической формы) свободная энергия $\Delta\Phi$ изменяется следующим образом:

$$\Delta\Phi = 4\pi r^2 n\sigma - \frac{4}{3}\pi r^3 n\Delta F,$$

где r — радиус частицы новой фазы; n — число частиц.

Исследование этого уравнения показывает, что функция $|\Delta\Phi|$ имеет максимум (рис. 4.4). Зародыш будет расти, если его радиус $r \geq r_{кр}$, так как увеличение размера зародыша приведет к уменьшению $|\Delta\Phi|$. Таким образом, для данной степени переохлаждения имеется некоторый зародыш критического размера $r_{кр}$. Все зародыши большего размера будут центрами кристаллизации, а зародыши меньшего размера окажутся неустойчивыми и вновь рассасываются в жидкости.

Критический размер связан с термодинамическими параметрами зависимостью

$$r_{кр} = \frac{2\sigma}{\Delta F}.$$

Оксиды, нитриды и сульфиды имеют высокую температуру плавления и могут быть центрами кристаллизации.

В реальных условиях процессы кристаллизации в значительной мере зависят от имеющихся готовых центров кристаллизации. Такими центрами могут быть твердые частицы разнообразных примесей, стенки формы. Особенно эффективны частицы таких веществ, которые по своему кристаллическому строению похожи на затвердевающий металл. Это сходство проявляется в близком соответствии расположения атомов на определенных плоскостях решеток металла и примеси.

Растворенные примеси в металле способствуют увеличению числа центров, если примеси будут поверхностно-активными веществами, понижающими поверхностное натяжение. В этом случае уменьшается критический размер зародыша, что эквивалентно увеличению степени переохлаждения.

4.3. Форма кристаллических образований

Расплавленные металлы, как правило, кристаллизуются без значительного переохлаждения. Для кристаллизации из раствора необходимо выполнить два условия:

- создать переохлаждение, то есть охладить раствор ниже температуры равновесной кристаллизации;
- создать в растворе один или несколько центров кристаллизации.

Следует реализовать особые условия, чтобы жидкость затвердела в один кристалл с идеальной структурой – монокристалл.

Чаще результатом кристаллизации являются не моно-, а поликристаллы.

Форма зерен, образующихся при кристаллизации, зависит от условий их роста, главным образом от скорости и направления отвода теплоты и температуры жидкого металла, а также от примесей.

В направлении отвода теплоты кристалл растет быстрее, чем в другом направлении. В результате образуется древовидный кристалл, так называемый дендрит, схема которого показана на рис. 4.5. Дендриты часто образуются при кристаллизации сплавов. Дендритное строение типично для литого металла. Установ-

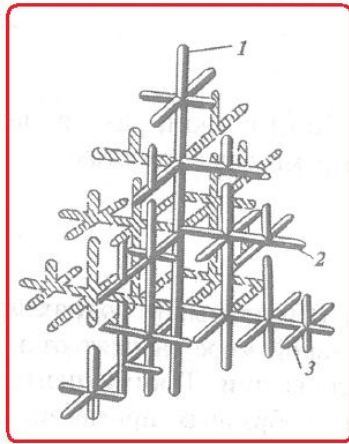


Рис. 4.5. Схема дендритного роста кристалла: 1 – ось первого порядка; 2 – ось второго порядка; 3 – ось третьего порядка

лено, что наибольшая скорость роста кристаллов наблюдается по таким плоскостям и направлениям решетки, которые имеют наибольшую плотность упаковки атомов. В результате вырастают длинные ветви, которые называются осями первого порядка. Затем на этих осях появляются и начинают расти ветви второго порядка и т. д.

Одновременно идет кристаллизация в участках между осями дендритов. Дендриты растут до тех пор, пока не соприкоснутся друг с другом. После этого окончательно заполняются межосные пространства, и дендриты превращаются в полновесные кристаллы с неправильной внешней огранкой. Такие кристаллы называются зернами или кристаллитами. На границах между зернами в участках между осями дендритов накапливаются примеси, появляются поры из-за усадки и трудностей подхода жидкого металла к фронту кристаллизации. Условия отвода теплоты при кристаллизации значительно влияют на форму зерен. Это видно на примере кристаллизации стального слитка.

Дендритообразование характерно для веществ, мало склонных к переохлаждению и имеющих большую скорость кристаллизации. В противном случае от центров кристаллизации равномерно по всем направлениям растут кристаллические иголки, образуя так называемые сферолиты.



4.4. Строение слитка

Структура любого слитка состоит из трех основных зон. Первая зона – наружная мелкозернистая корка 1, состоящая из дезориентированных мелких кристаллов – дендритов. При соприкосновении со стенками изложницы в тонком прилегающем слое жидкого металла возникают резкий градиент температур и явление переохлаждения, ведущее к образованию большого количества центров кристаллизации. В результате корка получает мелкозернистое строение (рис. 4.6).

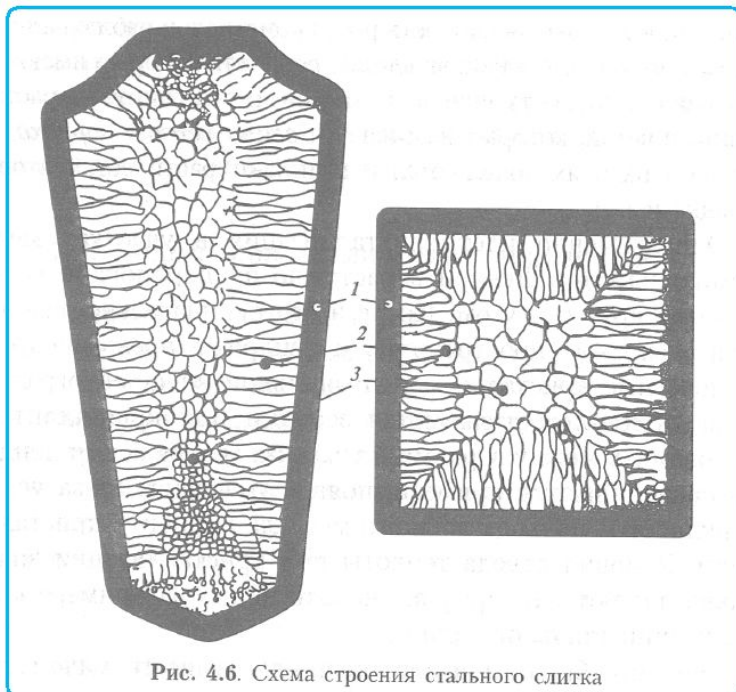


Рис. 4.6. Схема строения стального слитка

Вторая зона слитка — зона столбчатых кристаллов 2. После образования корки 1 условия теплоотвода меняются (из-за теплового сопротивления, повышения температуры стенки изложницы и других причин), градиент температуры в прилегающем слое жидкого металла резко уменьшается и, следовательно, уменьшается степень переохлаждения стали. В результате из небольшого числа центров кристаллизации начинают расти нормально ориентированные к поверхности корки (то есть в направлении отвода теплоты) столбчатые кристаллы.

Третья зона слитка — зона равноосных кристаллов 3. В центре слитка уже нет определенной направленности отдачи тепла. В результате в середине слитка, где наблюдается наименьшая степень переохлаждения, образуются равноосные кристаллы больших размеров.

При некоторых условиях (перегретый жидкий металл, малое содержание примесей и др.) зона крупных равноосных

кристаллов полностью исчезает. Структура слитка практически состоит из одних столбчатых кристаллов и называется транскристаллической. Зона столбчатых кристаллов характеризуется наибольшей плотностью, но в месте стыка столбчатых кристаллов собираются нерастворимые примеси, и слитки с транскристаллической структурой часто растрескиваются при обработке давлением. Транскристаллизация часто наблюдается в сварных швах, уменьшая их прочность.

В верхней части слитка, которая затвердевает в последнюю очередь, концентрируется усадочная раковина. Под усадочной раковиной металл получается рыхлым, в нем содержится много усадочных пор. Часть слитка с усадочной раковиной и рыхлым металлом отрезают. Слиток имеет неоднородный состав. Например, в стали по направлению от поверхности к центру и снизу вверх увеличивается концентрация углерода и вредных примесей — серы и фосфора. Химическая неоднородность по отдельным зонам слитка называется зональной ликвацией. Она отрицательно влияет на механические свойства.

4.5. Вторичная кристаллизация

Вторичной кристаллизацией называется процесс, в результате которого происходит полная замена одной кристаллической структуры на другую (аллотропическое превращение) или частичное изменение структуры (выделение новой фазы из твердого раствора при изменении его концентрации). Как и первичная кристаллизация, вторичная кристаллизация идет путем образования центров кристаллизации и их роста. Здесь справедливы

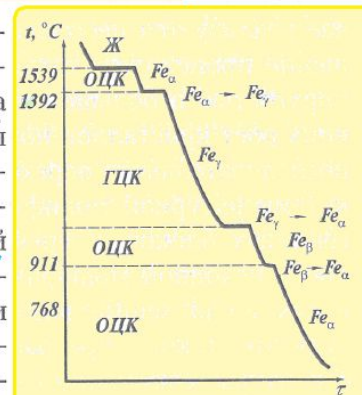


Рис. 4.7. Кривая охлаждения чистого железа

и другие закономерности первичной кристаллизации. В частности, с увеличением степени переохлаждения уменьшается критический размер зародыша. Однако для процессов вторичной кристаллизации характерны и свои, присущие им особенности. При охлаждении превращение начинается ниже равновесной температуры T_s и идет с выделением теплоты, при нагреве оно наступает выше T_s и протекает с поглощением тепла. На кривой охлаждения (нагрева) чистого металла аллотропическому превращению соответствует остановка. На рис. 4.7 приведена кривая охлаждения чистого железа.

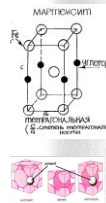
Поскольку кристаллическая решетка каждой аллотропической модификации обладает определенной присущей ей плотностью, превращение сопровождается изменением объема и возникновением внутренних напряжений.

Например, аллотропическое превращение белого олова с плотностью $7,3 \text{ г/см}^3$ в серое с плотностью $5,7 \text{ г/см}^3$ вызывает разрушение серого олова в порошок.

Механизм роста новой модификации может быть нормальным и мартенситным.

Нормальный механизм роста кристаллов присущ металлам с высокой температурой аллотропического превращения (Fe, Ti, Zr) при условии их медленного охлаждения. В этом случае реализуется небольшая степень переохлаждения, превращение происходит, когда металл пластичен, обладает малой упругостью и большой подвижностью атомов. В таких условиях рост кристаллов новой модификации происходит путем последовательного перехода к ним атомов от исходной высокотемпературной модификации. Новая фаза зарождается на границах блоков с зерен исходной модификации. Пластичность исходной модификации соответствует релаксации упругих напряжений, возникающих при превращении. В результате такого превращения образуются полиэдрические структуры, состоящие из равноосных кристаллов.

Мартенситный механизм роста кристаллов присущ металлам с низкой температурой аллотропического превращения (Co). В металлах с высокой температурой аллотро-



пического превращения (Fe, Ti, Zr) он наблюдается при больших переохлаждениях, то есть также при низких температурах.

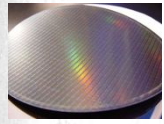
При мартенситном превращении Fe_γ в Fe_α подавляется диффузия углерода. В результате получается мартенсит, значительно пересыщенный углеродом, отличающийся от безуглеродистого более высокой прочностью и твердостью.

Таким образом, аллотропия позволяет изменять структуру и свойства металлов, особенно сплавов, путем нагрева выше температуры аллотропических (фазовых) превращений и охлаждения с различными скоростями, иначе говоря, при помощи термической обработки.

Превращение, при котором осуществляется мартенситный механизм, называется мартенситным превращением, а образующаяся при этом фаза — мартенситом.

Изоплан кристаллов мартенсита. Скорость роста кристаллов мартенсита близка к скорости звука (порядка 1000 м/с в металле) и время роста одного кристалла близко к 10⁻⁸ с. Общий превращенный объем увеличивается.

4.6. Получение монокристаллов



Большое научное и практическое значение имеют монокристаллы. Металлы в монокристаллическом состоянии отличаются высокой степенью чистоты и минимальными структурными несовершенствами. Получение монокристаллов позволяет изучить истинные свойства металлов, исключить влияние границ зерен. Применение в монокристаллическом состоянии германия и кремния высокой чистоты дает возможность использовать их свойства полупроводников и свести к минимуму неконтролируемые изменения электрических свойств. Монокристаллические лопатки авиационных двигателей позволяют повысить их надежность и ресурс работы.

Монокристаллы можно получить, если создать условия для роста кристалла только из одного центра кристаллизации.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое равновесная кристаллизация?
2. Каковы условия перехода металла из жидкого состояния в твердое?
3. Какие факторы обуславливают форму зерен при кристаллизации металла?
4. Каковы особенности вторичной кристаллизации?
5. Какие свойства имеют монокристаллы и каковы условия их получения?

Глава 5

СТРОЕНИЕ СПЛАВОВ

5.1. Определение сплава

Чистые металлы находят довольно ограниченное применение. Их используют главным образом в электрорадиотехнике (проводниковые, электровакуумные и другие материалы). Основными конструкционными материалами являются металлические сплавы.

Преимущественное использование в технике металлических сплавов объясняется тем, что они обладают более ценными, чем чистые металлы, комплексами механических, физических и технологических свойств.

Сплавом называется вещество, полученное сплавлением двух или более элементов. Сплав, приготовленный преимущественно из металлических элементов и обладающий металлическими свойствами, называется металлическим сплавом. Металлические сплавы можно получать методом порошковой металлургии, диффузией, возгонкой, электролизом и другими методами.

К основным понятиям в теории сплавов относятся: система, компонент, фаза.

Система — группа тел, выделяемых для изучения и наблюдений. В материаловедении системами являются металлы и

металлические сплавы. Чистый металл является простой системой. Сплавы из двух или более составляющих элементов являются сложными системами.

Компоненты сплава — это вещества, образующие систему. В металлических сплавах компонентами могут быть элементы (металлические и неметаллические) и химические соединения (не диссоциирующие при нагревании).

Фазой называется однородная часть системы, отделенная от другой части системы (фазы) поверхностью раздела, при переходе через которую химический состав или структура изменяются скачком. В твердых сплавах фазами могут быть зерна чистого металла, зерна твердого раствора и зерна химического соединения.

Почти все металлы в жидком состоянии растворяются один в другом в любых соотношениях. В результате растворения образуется однородный жидкий раствор с равномерным распределением атомов одного металла среди атомов другого металла. Лишь очень немногие металлы, главным образом сильно различающиеся размерами атомов, не растворяются в жидком состоянии, а если и растворяются, то ограниченно.

При образовании сплавов в процессе их затвердевания возможны различные взаимодействия входящих в них компонентов, что обуславливает разное строение сплавов.

5.2. Механическая смесь

Механическая смесь образуется после кристаллизации сплава, если в процессе кристаллизации сила взаимодействия между однородными атомами окажется больше силы взаимодействия между разнородными атомами. В этом случае в твердом сплаве будут присутствовать зерна одного чистого металла и рядом с ними — зерна другого чистого металла. Такая фаза возникает при большом различии в свойствах входящих в сплав металлов.

5.3. Твердые растворы

Твердые растворы — это такие твердые фазы, в которых соотношения между компонентами могут изменяться. В твердом растворе, так же как и в чистых металлах, атомы в пространстве расположены закономерно, образуя кристаллическую решетку. Этим твердые растворы отличаются от жидких растворов. В твердом растворе одно из входящих в состав сплава веществ сохраняет присущую ему кристаллическую решетку, а второе вещество, утратив свое кристаллическое строение, в виде отдельных атомов распределяется в кристаллической решетке первого. Первое вещество называется растворителем, второе — растворимым.

Твердые растворы обозначают буквами греческого алфавита: α , β , γ .

В зависимости от характера распределения атомов растворимого элемента различают твердые растворы внедрения или замещения. Независимо от типа твердого раствора общим для них является то, что они однофазны и существуют в интервале концентраций. Для твердых растворов характерен металлический тип связи.

В твердых растворах внедрения атомы растворимого элемента распределяются в кристаллической решетке металла-растворителя, занимая место между его атомами (рис. 5.1, б). Поскольку у металлов атомы в кристаллической решетке располагаются близко один к другому и пустоты имеют малые размеры, разместиться в таких пустотах могут только атомы с очень малыми размерами.

Наименьшие размеры атомов имеют некоторые металлоиды — водород, азот, углерод, бор, которые и образуют с металлами твердые растворы внедрения. Но и у этих элементов размеры атомов несколько превышают размеры межатомных промежутков в кристаллической решетке металлов. Поэтому при образовании твердых растворов внедрения решетка искажается, и в ней возникают напряжения. При этом концентрация твердого раствора внедрения не может быть высокой: она редко превышает 1–2 %.

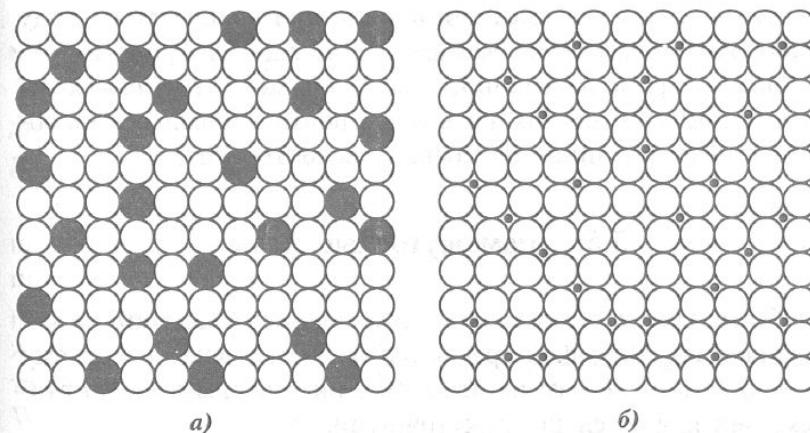


Рис. 5.1. Атомно-кристаллическая структура твердого раствора (схема): а — твердый раствор замещения; б — твердый раствор внедрения

В твердых растворах замещения атомы растворимого элемента занимают место атомов основного металла (рис. 5.1, а). Посторонние атомы могут замещать атомы растворителя в любых местах, поэтому такие растворы называют неупорядоченными твердыми растворами. Размеры атомов растворимого элемента всегда отличаются от размеров атома растворителя (они больше или меньше), поэтому при образовании твердого раствора замещения кристаллическая решетка металла-растворителя немного искажается, не утрачивая при этом своего основного строения. Твердые растворы замещения могут быть ограниченными и неограниченными. Одно из условий неограниченной растворимости — размерный фактор: чем больше различие в атомных радиусах, тем меньше растворимость.

См. след. слайд

5.4. Химические соединения

Химические соединения чаще всего образуются между элементами, расположенными далеко один от другого в таблице Д.И. Менделеева, то есть существенно различающимися

Контрольные вопросы

1. Какие тела называют металлами? Какие металлы относят к переходным?
2. Какие характеристики описывают кристаллическое строение металлов?
3. Какие типы дефектов кристаллического строения металлов принято считать основными?
4. Каковы причины различий в скоростях диффузии атомов в объеме зерна и по границам? Что такое энергия активации диффузии? Какова размерность коэффициента диффузии?
5. Что такое переохлаждение при кристаллизации и чем оно обусловлено?
6. От каких факторов зависит размер зерна в литом сплаве? Что такое модификаторы?

Глава II МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ И ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ

1. Характеристика основных фаз в сплавах

В предыдущих разделах, рассмотрение кристаллического строения металлических материалов и процессов кристаллизации, относилось лишь к чистым металлам. Но чистые металлы используют в технике редко, потому что, как правило, они обладают низкой прочностью и ограниченным разнообразием свойств.

Широкое техническое применение нашли металлические сплавы, т. е. смеси нескольких металлов, прошедших совместное плавление и образовавших связанное тело.

Элементы, образующие сплав, являются его *компонентами*. Компонентами сплава могут быть как металлические, так и неметаллические элементы.

В отношении взаимной растворимости компонентов возможны два предельных случая: 1. Компоненты сплава *неограниченно растворяются друг в друге* как в жидком, так и в твердом состояниях. При этом в твердом состоянии в кристаллической решетке одного металла (называемого растворителем) собственные атомы заменяются атомами второго металла, образуется *гомогенный* сплав, называемый твердым раствором. Кристаллическая решетка твердого раствора такая же, как у исходных компонентов, на рентгенограмме присутствует только одна (характерная для данной фазы) система линий.



**Химическое
соединение**

! Не сплав

2. Компоненты сплава *практически не образуют твердых растворов*. В этом случае сплав состоит из смеси кристаллов разного сорта. Такую смесь кристаллов иногда называют механической, но правильнее ее называть *гетерогенной смесью* кристаллов. Примером могут служить сплавы системы медь—свинец. На рентгенограммах, снятых с образцов таких сплавов, обязательно имеются линии, относящиеся к *чистым компонентам*.

Но на практике чаще всего проявляются не два рассмотренных выше предельных случая, а промежуточные, когда один компонент частично растворяется в другом, причем в результате взаимодействия компонентов могут образовываться новые фазы или соединения, кристаллическая решетка которых может не совпадать с решетками ни одного из входящих в сплав компонентов, но может и совпадать.

Полная взаимная растворимость может проявляться только при сплавлении элементов с кристаллическими решетками одного и того же типа, причем размеры атомов компонентов не должны отличаться более чем на 15%. Непрерывный ряд твердых растворов образуют системы Ni—Cu, Ag—Au, Au—Pt, Mo—V, Mo—W и др. У образующихся твердых растворов кристаллические решетки не отличаются от исходных компонентов только по типу (ОЦК, ГЦК, ГПУ), периоды же решеток в твердом растворе будут непрерывно меняться в зависимости от концентрации того или другого металла (рис. 19).

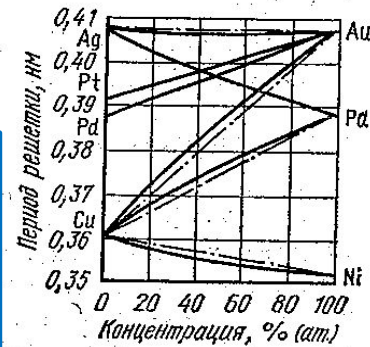


Рис. 19. Зависимость периодов решеток твердых растворов от концентрации легирующих элементов

Но, кроме двух отмеченных выше условий (типа решетки и размеров атомов), для образования ряда непрерывных твердых растворов должно выполняться еще одно ограничение, обусловленное химическим взаимодействием между компонентами, образующими сплав: это взаимодействие не должно быть велико. Если взаимодействие слишком велико, то образуется не твердый раствор, а *химическое соединение*. Так, например, алюминий по размеру атомов почти совпадает с медью и золотом, име-

по строению и свойствам, когда сила взаимодействия между разнородными атомами больше, чем между однородными.

Обычно фазы постоянного состава называют химическими соединениями. В сплавах чаще всего формула химического соединения не подчиняется правилу валентности.

Решетка не такая, как у исходных веществ и в узлах может не быть атомов, а также межузельные дополнительные (интервал концентраций за счет этого)

5.5. Промежуточные фазы

Кроме твердых растворов и химических соединений, в металлических сплавах встречаются фазы, которые по своему строению и свойствам не относятся ни к первым, ни ко вторым; они являются промежуточными.

Как и химические соединения, такие промежуточные фазы имеют свою, отличную от образующих их компонентов кристаллическую решетку, но в то же время они могут существовать в интервале концентраций, как твердые растворы.

Промежуточные фазы могут быть постоянного и переменного состава.

Промежуточные фазы многочисленны и разнообразны. Эти соединения не подчиняются закону валентности. Рассмотрим некоторые из них.

Интерметаллиды — соединения между металлами (например, CuAl_2 , MoFe_2 , Ni_3Ti и др.).

Металлические соединения — это фазы с металлическим типом связи. Такие фазы образуются при взаимодействии переходных металлов с C, N, H, которые называются соответственно карбидами, нитридами, гидридами. Кристаллическая структура этих соединений зависит от относительных размеров атомов неметалла $R_{\text{НМ}}$ и атомов металла $R_{\text{М}}$. Если отношение $R_{\text{НМ}}/R_{\text{М}} < 0,59$, образуются промежуточные фазы с простыми пространственными решетками. Эти промежуточные фазы называются фазами внедрения.

Если $R_{\text{НМ}}/R_{\text{М}} > 0,59$, образуются сложные пространственные решетки с большим числом атомов в элементарной ячейке.

Для Fe_3C $R_{\text{НМ}}/R_{\text{М}} = 0,91/1,26 = 0,72$

Химический состав фаз внедрения указывается формулами: MX , M_2X , M_4X и MX_4 , где М — металл; X — неметалл.

К фазам внедрения типа MX относятся следующие карбиды: TiC , NbC , WC , MoC , VC . Примером типа M_4X является Fe_4N , а фазы типа MX_4 — гидрид циркония ZrH_4 .

Фазы внедрения — это самые тугоплавкие и твердые промежуточные фазы. Карбиды, относящиеся к фазам внедрения, присутствуют в структуре многих коррозионноустойчивых, жаропрочных и инструментальных сталей. Карбиды TiC , WC , W_2C , TaC служат основой спеченных твердых сплавов для режущих инструментов. Использование таких карбидных сплавов позволило увеличить скорость резания в десятки раз.

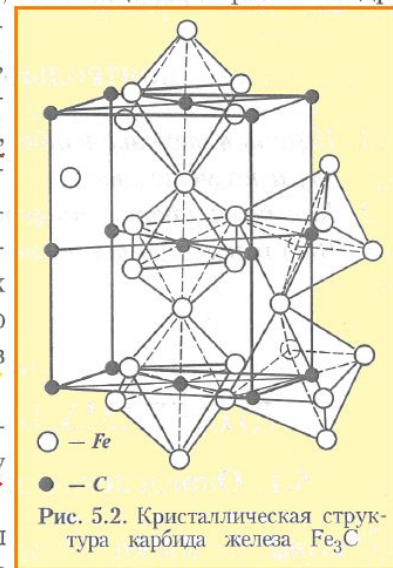
Карбид железа имеет сложную ромбическую структуру (рис. 5.2).

Эти промежуточные фазы отличаются высокой твердостью

и хрупкостью, они также достаточно тугоплавки, но уступают по этим свойствам карбидам, являющимся фазами внедрения.

Электронные соединения характеризуются определенным отношением числа валентных электронов к числу атомов (электронной концентрацией) и образуются при взаимодействии металлов 1-го класса (Cu , Ag , Au , Mn , Fe , Co , Ni) с металлами 2-го класса (Zn , Al , Sn , Si , Mg , Cd и др.). Подобные соединения встречаются во многих важных технических сплавах ($\text{Cu} + \text{Zn}$), ($\text{Cu} + \text{Sn}$), ($\text{Fe} + \text{Al}$), ($\text{Cu} + \text{Si}$) и т. д.

Обычно в системе наблюдаются следующие фазы:
— β -фаза, электронная концентрация которой равна $\frac{3}{2}$, решетка ОЦК — CuZn , CuBe , Cu_3Al , Cu_5Sn , AgMg и др.;



– γ -фаза, электронная концентрация которой равна $\frac{21}{13}$, решетка сложная кубическая – Cu_5Zn_8 , $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$, $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$ и др.;

– Σ -фаза, электронная концентрация которой равна $\frac{7}{4}$, решетка ГПУ – Cu_3Sn , Ag_5Al_3 , CuZn_3 , AuCd_3 и т. д.

Электронные соединения могут образовывать с компонентами, из которых они состоят, твердые растворы в широком интервале концентрации.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему в технике наибольшее применение получили сплавы, а не металлы?
2. Как различаются по своему строению сплавы?
3. Что такое промежуточные фазы и каковы их свойства?

Глава 6

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ

6.1. Определение диаграммы состояния

Сплавы называют однородными (гомогенными), если структура их однофазная, и разнородными (гетерогенными), если структура их состоит из нескольких фаз. Для сплавов, образованных одними и теми же компонентами, фазовое состояние описывается диаграммой состояния.

Диаграмма состояния – графическое изображение состояния любого сплава изучаемой системы в зависимости от его концентрации и температуры. Диаграмма состояния показывает равновесные, устойчивые состояния, то есть такие, которые обладают минимальной свободной энергией. Изучение любого сплава прежде всего начинается с построения и анализа диаграммы состояния, так как именно она дает возможность изучать фазы и структурные составляющие сплава.

Пользуясь диаграммой состояния, можно установить возможность проведения термической обработки и ее режимы, температуры литья, горячей пластической деформации и т. д.

6.2. Правило фаз

Правило фаз устанавливает температурные условия процесса кристаллизации при заданном давлении, а также определяет, сколько фаз должно быть в чистом компоненте или в сплаве определенного состава, если они находятся в равновесном состоянии при данной температуре (или давлении). Число факторов, которые можно менять, не изменяя фазового состава сплава, называется степенью свободы.

Правило фаз выражает зависимость между числом степеней свободы С (вариантностью) системы, числом компонентов К и числом фаз Ф системы, находящихся в равновесии (рис. 6.1).

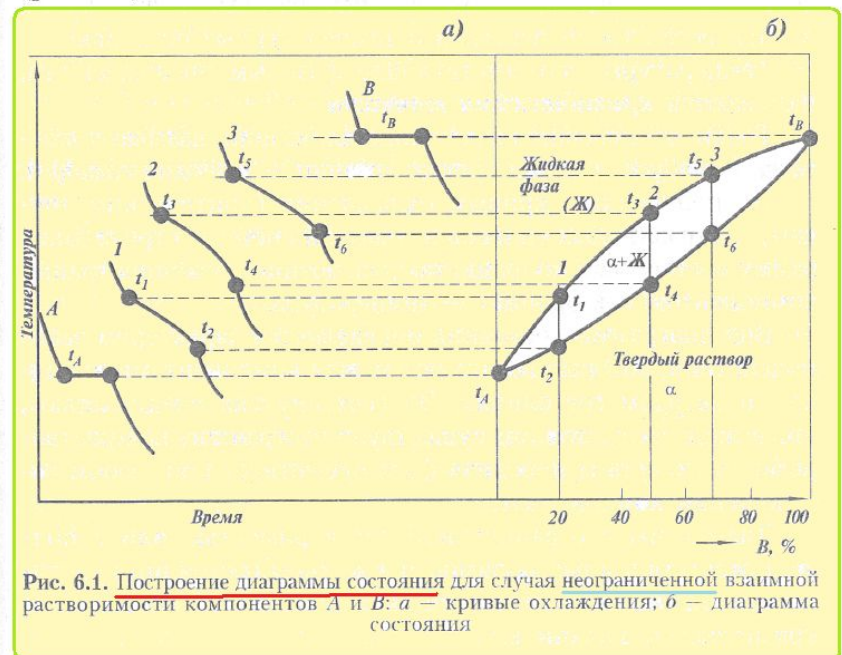


Рис. 6.1. Построение диаграммы состояния для случая неограниченной взаимной растворимости компонентов А и В: а – кривые охлаждения; б – диаграмма состояния

Обычно все превращения в металлах и сплавах происходят при постоянном давлении (атмосферном). Тогда правило фаз записывается так:

$$C = K - \Phi + 1.$$

Уравнение правила фаз позволяет корректировать правильность построения диаграмм состояния.

Построение диаграмм состояния осуществляют экспериментальными методами. Наиболее часто пользуются методом термического анализа. Сущность этого метода заключается в следующем. Отбирают несколько сплавов данной системы с различным отношением масс входящих в них компонентов. Сплавы помещают в огнеупорные тигли и нагревают в печи. После расплавления сплавов тигли с ними медленно охлаждают и фиксируют скорость охлаждения. По полученным данным строят термические кривые в координатах «время—температура» (рис. 6.1).

В результате измерений получают серию кривых охлаждения, на которых при температурах фазовых превращений наблюдаются точки перегиба и температурные остановки.

Температуры, соответствующие фазовым превращениям, называются критическими точками.

Точки, отвечающие началу кристаллизации, называют точками ликвидуса, а конца кристаллизации — точками солидуса.

По полученным кривым охлаждения (критическим точкам) для различных сплавов изучаемой системы строят диаграмму состояния в координатах; ось абсцисс — концентрация компонентов, ось ординат — температура.

Вид диаграммы состояния определяется характером взаимодействий, которые возникают между компонентами в жидком и твердом состояниях. Во всех случаях предполагают, что в жидком состоянии существует неограниченная растворимость, то есть однородная фаза существует при любом соотношении компонентов.

Диаграммы с ограниченной растворимостью или с полным отсутствием растворимости в жидком состоянии практического значения не имеют, так как сплавы этих систем мало применяются в технике.

6.3. Диаграмма состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы

Полная взаимная растворимость металлов в твердом состоянии возможна лишь для изоморфных металлов. При их сплавлении образуется непрерывный ряд твердых растворов замещения. Например, имеются компоненты А и В; фазы — жидкий раствор Ж и твердый раствор α . Температура охлаждающегося чистого компонента А понижается до t_A (рис. 6.1, а, кривая А), при которой компонент А затвердевает. На кривой отмечается остановка (горизонтальная линия), так как, согласно правилу фаз, в этом случае при постоянной температуре могут сосуществовать только две фазы — твердая и жидкая ($C = 1 + 1 - 2 = 0$). После затвердевания компонента А, когда $\Phi = 1$, температура снова понижается. Аналогично может быть рассмотрена кристаллизация и компонента В (рис. 6.1, а, кривая В).

При охлаждении сплава 1 температура понижается до t_1 (рис. 6.1, а). При температуре t_1 начинается процесс кристаллизации и на кривой охлаждения отмечается перегиб (критическая точка), связанный с уменьшением скорости охлаждения вследствие выделенной скрытой теплоты кристаллизации.

Начиная с температуры t_1 из жидкого сплава кристаллизуется твердый раствор α . Процесс кристаллизации протекает при понижающейся температуре, так как, согласно правилу фаз, в двухкомпонентной системе при наличии двух фаз (жидкой и кристаллов твердого раствора α) число степеней свободы равно единице ($C = 2 + 1 - 2 = 1$).

При температуре t_2 сплав затвердевает, и при более низких температурах существует только α -твердый раствор. Аналогично затвердевают и другие сплавы (например, 2 и 3) этой системы.

Если найденные критические точки от t_1 до t_2 перенести на диаграмму, где по оси абсцисс нанесен состав сплава, а по оси ординат — температура, и одноименные критические точ-

ки соединить плавными кривыми, то получается диаграмма состояния системы сплавов А и В, образующих непрерывный ряд твердых растворов (рис. 6.1, б).

Начало затвердевания сплавов происходит при температурах, соответствующих линии ликвидус t_A t_3 t_B . Температура окончания кристаллизации соответствует линии солидус t_A .

В интервале температур между линиями ликвидус и солидус сосуществуют две фазы — жидкий сплав и твердый раствор α .

Линии m_2n_2 и m_3n_3 и другие, соединяющие составы фаз в равновесии, называются конодами (рис. 6.2).

Пользуясь диаграммой состояния, можно для любой температуры определить не только число фаз, но и их состав и количественное соотношение.

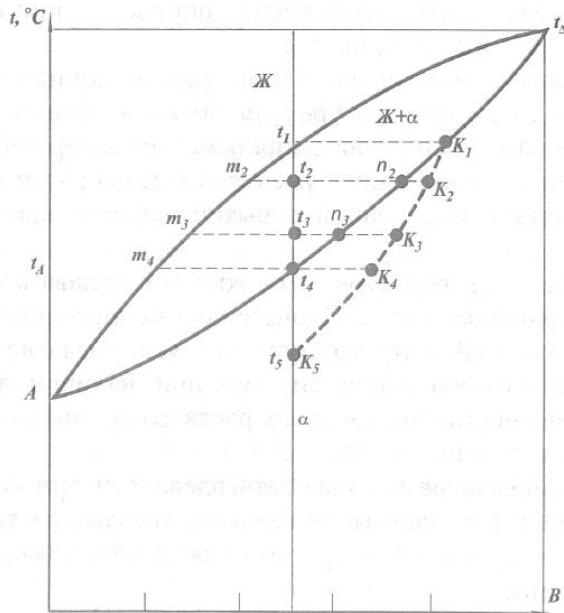


Рис. 6.2. Диаграмма состояния для случая неограниченной растворимости компонентов А и В

Правило отрезков позволяет определять это соотношение. Оно может быть использовано только для двухфазной области диаграммы состояния. Согласно этому правилу необходимо вычислить отношение длины отрезка, примыкающего к составу жидкой фазы, к длине всей коноды, что показывает массовое, или объемное, количество твердой фазы. Для определения количества жидкой фазы вычисляется отношение длины отрезка, примыкающего к составу твердой фазы, к длине коноды.

Следовательно, количество твердой фазы (в процентах) при температуре t_2 определится отношением отрезка t_2m_2 к длине коноды m_2n_2 :

$$\alpha = \frac{t_2m_2}{m_2n_2} \cdot 100 \%$$

Количество жидкой фазы

$$\text{Ж} = \frac{t_2n_2}{m_2n_2} \cdot 100 \%$$

Неравновесная кристаллизация. В реальных условиях охлаждения состав в пределах каждого кристалла и разных кристаллов не успевает выравняться, и он не будет одинаковым (рис. 6.2).

При температуре t_2 состав жидкой фазы будет соответствовать точке m_2 , а α -фазы — точке n_2 . Но отдельные части кристаллов α -фазы, которые образовались при температуре выше t_2 , не изменили своего начального состава, и средний состав кристаллов будет соответствовать точке K_2 . При понижении температуры средний состав кристаллов α -твердого раствора все более отклоняется от равновесного. При температурах t_3 он будет соответствовать не n_3 , а K_3 . Если через точки $K_1 - K_5$ провести кривую, то она будет характеризовать средний состав кристаллов α при данной скорости охлаждения. При температурах t_4 в условиях равновесия фаз выбранный сплав должен затвердеть. В неравновесных условиях этого

не произойдет, так как в сплаве останется жидкая фаза, количество которой определится из соотношения $(t_4 K_4 / m_4 K_4)$. Сплав затвердеет тогда, когда средний состав α -фазы будет соответствовать составу взятого сплава. Это произойдет при температуре t_5 , когда периферийные зоны кристаллов будут иметь состав, отвечающий 50 % компонента В. Следовательно, в неравновесных условиях сплав затвердевает ниже равновесной температуры затвердевания. Линию K_1-K_5 называют линией неравновесного солидуса. Каждый сплав при заданной скорости охлаждения характеризуется своим неравновесным солидусом.

Скорость приращения твердой фазы при понижении температуры называется темпом кристаллизации.

Дендритная (внутрикристаллитная) ликвация. В результате неравновесной кристаллизации химический состав образующихся кристаллов α -твердого раствора по сечению оказывается переменным.

В процессе кристаллизации образуются кристаллы твердого раствора дендритного типа. Поэтому оси первого порядка, возникающие в начальный момент кристаллизации, обогащены более тугоплавким компонентом В. Периферийные слои кристаллов и межосные пространства, кристаллизующиеся в последнюю очередь, будут обогащены компонентом А, понижающим температуру плавления сплава, и их состав близок к концентрации, соответствующей исходной концентрации сплава. Такую неоднородность состава сплава внутри отдельных кристаллов называют внутрикристаллитной или дендритной ликвацией.

Чем больше температурный интервал кристаллизации сплава, то есть чем больше расстояние между линиями ликвидуса и солидуса, тем больше проявляется дендритная ликвация.

Дендритная ликвация может быть ослаблена продолжительным нагревом сплава при температурах, обеспечивающих достаточную скорость диффузии ($0,8-0,9 T_{пл}$). После такого нагрева, называемого диффузионным отжигом или гомогенизацией, дендритная ликвация литого сплава уменьшается.

Зональная ликвация. Кроме внутрикристаллитной ликвации, химическая неоднородность образуется по зонам слитка; такую неоднородность называют зональной ликвацией.

Зональная ликвация по сечению слитка бывает прямой и обратной. При прямой зональной ликвации поверхностные зоны слитка обогащены компонентом, повышающим температуру плавления, а центральные зоны слитка содержат больше компонента, понижающего эту температуру. При обратной ликвации наблюдается противоположная закономерность. Развитие зональной ликвации зависит от скорости охлаждения, размера слитка, скорости диффузии, интервала температур кристаллизации и т. д. Обычно чем больше развита дендритная ликвация, тем меньше зональная ликвация. Для ослабления зональной ликвации применяют высокие скорости охлаждения, так как при этом развивается дендритная ликвация.

6.4. Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси чистых компонентов

Компоненты А и В; фазы — жидкий расплав; кристаллы А и В.

Диаграмма состояния для случая, когда компоненты А и В взаимно неограниченно растворимы в жидком состоянии и нерастворимы в твердом состоянии и при этом не образуют химические соединения, дана на рис. 6.3. Выше линии ACB , называемой линией ликвидуса, все сплавы находятся в жидком состоянии, ниже линии DCE , называемой линией солидус, — в твердом, между ними — в двухфазном состоянии.

Рассмотрим кристаллизацию сплавов I, II, III, отличающихся содержанием компонентов А и В. Температуры начала кристаллизации у них различные, но заканчивают кристаллизацию они при одной температуре t_3 .

Кривая кристаллизации сплава II аналогична кривым охлаждения чистых металлов, но температура плавления сплава

ПОСы для пайки являются эвтектическими сплавами.

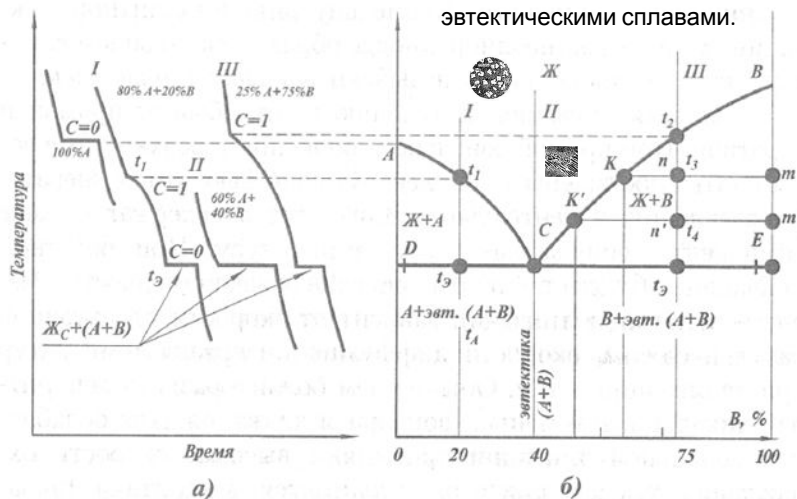


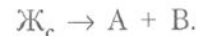
Рис. 6.3. Диаграмма состояния сплавов, образующих в твердом состоянии механические смеси: а – кривые охлаждения; б – диаграмма состояния

ниже, чем у образующих его компонентов. Особенность кристаллизации заключается в том, что кристаллизация обоих компонентов происходит одновременно, то есть одновременно появляются и растут кристаллы компонентов А и В, и таким образом образуется мелкокристаллическая смесь обоих компонентов.

Механическая смесь двух (или более) разнородных кристаллов, одновременно кристаллизующихся из жидкости определенного химического состава при постоянной и минимальной для сплавов данной системы температуре, называется эвтектикой. Химический состав эвтектической смеси определенных компонентов всегда одинаков (определяется точкой С на рис. 6.3). Для этого случая по правилам фаз имеем: $K = 2$ (А и В); $\Phi = 3$ (жидкость, кристаллы А и В); $C = 2 + 1 - 3 = 0$.

Сплавы I и III кристаллизуются в интервалах температур $(t_1 - t_3)$ и $(t_2 - t_3)$. При t_1 и t_2 образуются кристаллы того элемента, которому легче образовать устойчивый зародыш. При t_3 перераспределение закончится, остатки жидкой фазы достигнут эвтектической концентрации (точка С) и произойдет

совместная кристаллизация компонентов (число степеней свободы $C = 0$) по эвтектической реакции



В неравновесных условиях охлаждения может образоваться квазиэвтектика, когда механическая смесь имеет химический состав, несколько отличающийся от равновесного эвтектического.

6.5. Диаграмма состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии

Компоненты А и В такой системы обладают в жидком состоянии неограниченной растворимостью, а в твердом – ограниченной, меняющейся в зависимости от температуры. На рис. 6.4 изображена диаграмма такой системы.

Выше линии ACB (ликвидус) расположена область жидкого сплава. Линия ADCEB – солидус, линия DCE – линия эвтектического превращения, точка С – эвтектическая точка. Области ниже линий AD и BE отвечают соответственно твердым растворам α и β . При понижении температуры в застывшей системе происходит процесс выделения кристаллов твердого раствора, из которого затем выделяются кристаллы другого раствора. Этот процесс носит название вторичной кристаллизации. В интервале от точки D до точки E затвердевание происходит согласно диаграмме системы элементов, образующих механическую смесь. В точке С образуется эвтектика, состоящая из смеси компонентов твердых растворов α и β .

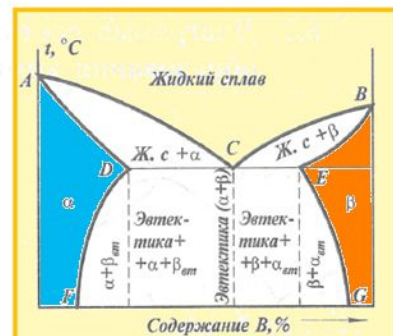
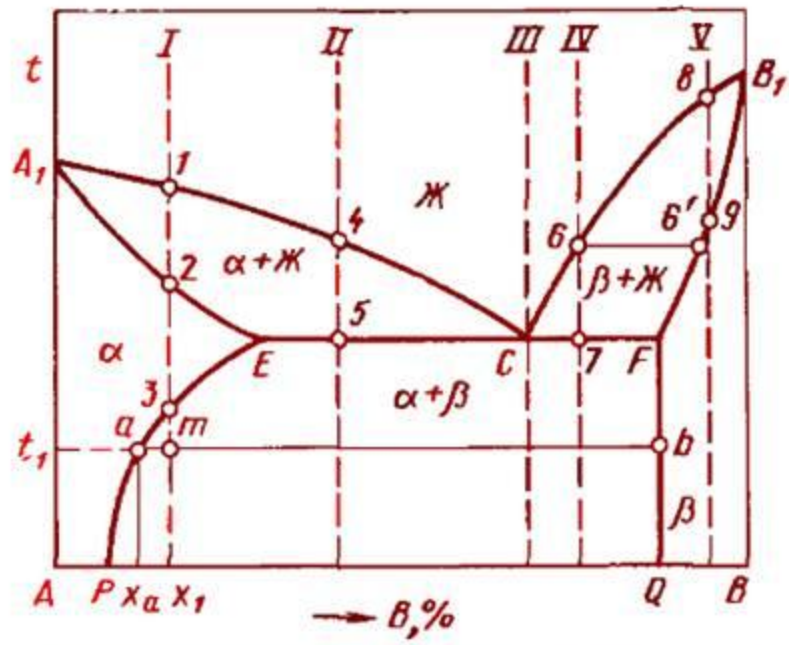


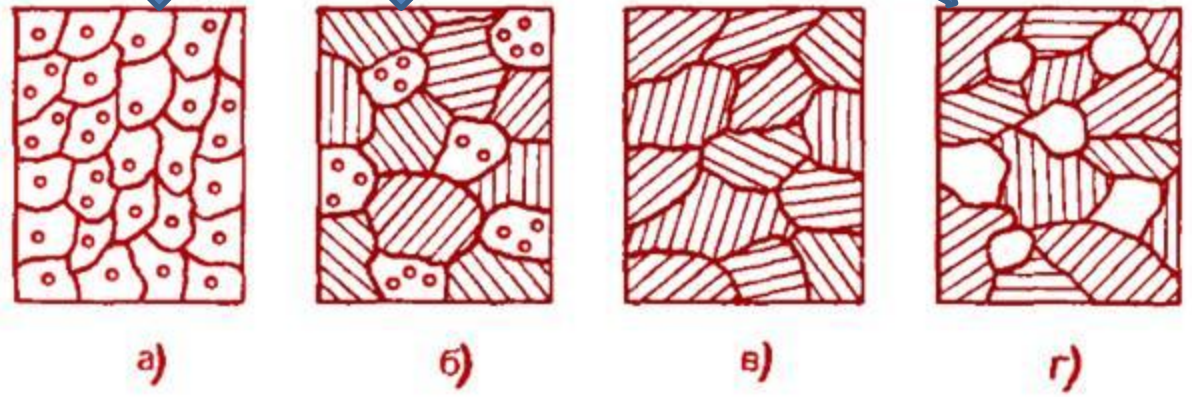
Рис. 6.4. Диаграмма состояния сплава из двух элементов для случая ограниченной растворимости компонентов в твердом растворе



α	$\alpha + \beta_{II}$	$\alpha + (\alpha + \beta)$	$\beta + (\alpha + \beta)$	β
----------	-----------------------	-----------------------------	----------------------------	---------

Рис. 3.5. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых ограниченно растворимы в твердом состоянии и образуют эвтектику

Рис. 3.6. Схемы структур характерных сплавов



6.6. Диаграмма состояния сплавов для случая перитектического превращения

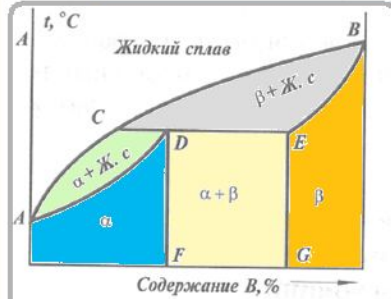


Рис. 6.5. Диаграмма состояния сплавов для случая перитектического превращения

Слово перитектика — греческое и означает «окружение». В этой системе компоненты в жидком состоянии обладают полной растворимостью, а в твердом состоянии растворимы частично. Выпавшие из жидкости кристаллы одного твердого раствора (строго определенного состава), реагируя с оставшейся жидкостью, образуют кристаллы

другого твердого раствора, которые окружают первые. Диаграмма такой системы изображена на рис. 6.5. Перитектическое превращение происходит при температурах, соответствующих горизонтальной линии CDE, называемой линией перитектического превращения, выше которой находятся твердый раствор β и жидкий сплав. Перитектическое превращение протекает очень медленно и в технических сплавах обычно не доходит до конца.

6.7. Диаграмма состояния сплавов для случая образования химического соединения

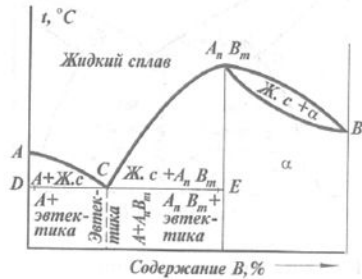
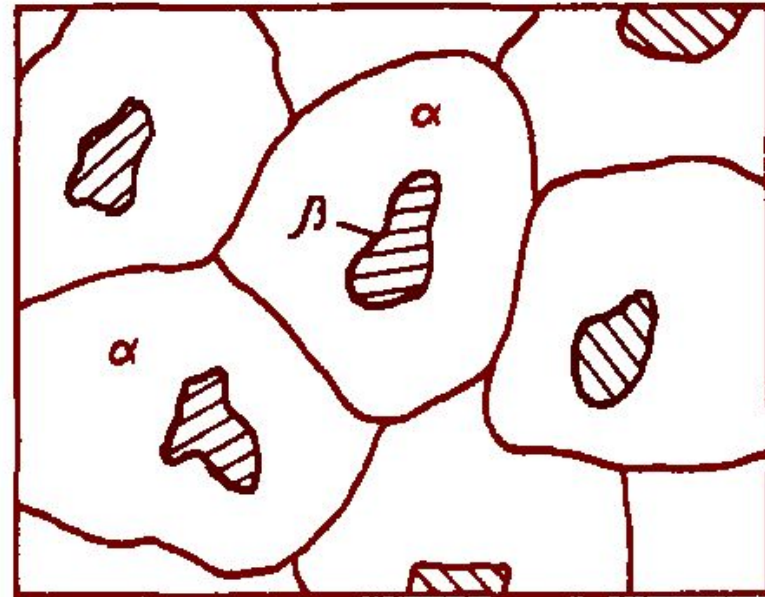
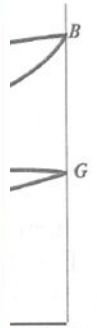


Рис. 6.6. Диаграмма состояния сплавов для случая образования химического соединения

На рис. 6.6 изображена диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют устойчивое химическое соединение, рассматриваемое как самостоятельный компонент, образующий с компонентами А и В простейшие диаграммы состояния. На приведенной диаграмме левая часть представляет случай отсутствия раствори-



случай
аллотропического превращения, а, б. еза, ти-



а) б)
Рис. 6.7. Диаграмма аллотропического превращения

6.8. Диаграмма состояния трехкомпонентного сплава

Основанием такой диаграммы является равносторонний треугольник (рис. 6.8). Каждая точка внутри треугольника отвечает определенному составу сплава из трех компонентов: А, В и С.

Для определения состава тройного сплава можно применить правило, известное из геометрии: сумма трех отрезков, отсекаемых на стороне равностороннего треугольника прямыми, проведенными

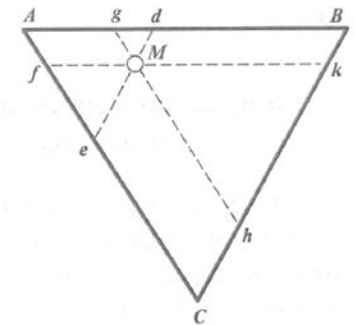


Рис. 6.8. Диаграмма состояния сплава из трех компонентов

ми через любую точку внутри него параллельно сторонам, является постоянной величиной и равна длине его стороны. Например, для точки M (рис. 6.8)

$$Af + Bd + Ch = AB.$$

Принимая сторону AB за 100 %, можно определить состав сплава в точке M по компонентам:

$$A = \frac{af}{AB} \cdot 100 \%;$$

$$B = \frac{bd}{AB} \cdot 100 \%;$$

$$C = \frac{ch}{AB} \cdot 100 \%.$$

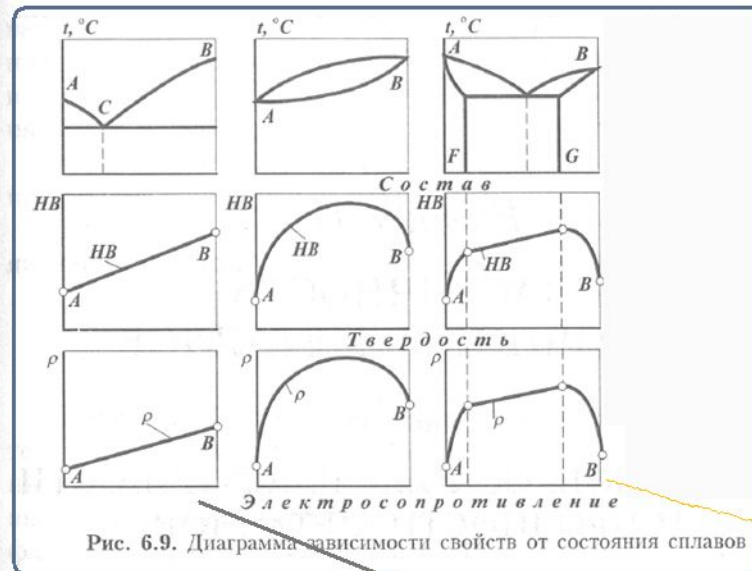
Вершины треугольников определяют чистые компоненты A , B и C . Каждая сторона треугольника определяет двойной сплав $A-B$, $B-C$ или $A-C$; каждая точка на стороне треугольника – состав двойного сплава. Точка внутри треугольника определяет тройной сплав. На перпендикулярах, восставленных из вершин треугольника, откладываются критические температуры. В отличие от диаграмм двойных сплавов, изображаемых на плоскости и имеющих линии ликвидуса и солидуса, диаграммы тройных сплавов имеют поверхности ликвидус и солидус, между которыми в пространстве сплав состоит из жидкости и кристаллических фаз.

С эвтектикой

Для неогранич. растворим. например.

6.9. Зависимость между свойствами сплавов и их диаграммами состояния

Н.С. Курнаков установил зависимость между свойствами сплавов и диаграммами состояния. Он наблюдал зависимость между твердостью, электропроводностью и типом диаграммы. Позднее была установлена зависимость механических и физических свойств сплавов от их состояния. На рис. 6.9 представлены диаграммы зависимости свойств от состояния сплавов.



У сплавов, образующих механическую смесь, твердость и электропроводность изменяются по прямой линии. Эти сплавы имеют эвтектический состав, легкоплавки, обладают хорошей жидкотекучестью. У сплавов с ограниченной растворимостью твердость и электропроводность изменяются по кривой. Структурно неоднородные сплавы легче обрабатываются инструментом. При широком интервале застывания получается пористый металл, а при небольшом расстоянии между линиями ликвидуса и солидуса сплав получается более однородным и плотным.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие зависимости устанавливают с помощью правила фаз?
2. Каким образом по диаграмме состояния сплавов можно определить количество жидкой и твердой фаз?
3. Каковы отличия дендритной и зональной ликвиаций; факторы, влияющие на их величину?
4. Назовите основные типы диаграмм состояния сплавов.
5. Какова связь свойств сплавов с типом диаграмм состояния?

Раздел II

ПЛАСТИЧНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Глава 7

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАСТИЧНОСТИ И ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ

7.1. Общая характеристика механических свойств

Под механическими свойствами понимают характеристики, определяющие поведение материала под действием приложенных внешних механических сил. Основными механическими свойствами являются прочность, пластичность, упругость, вязкость, твердость. Зная механические свойства, конструктор при проектировании обоснованно выбирает соответствующий материал, обеспечивающий надежность и долговечность машин и конструкций при их минимальной массе.

В результате механических испытаний получают числовые значения механических свойств, то есть значения напряжений или деформаций, при которых происходят изменения физического и механического состояний материала.

Наличие металлической связи придает металлу способность к пластической деформации и к самоупрочнению в результате пластической деформации. Поэтому если внутри материала есть дефект или имеются концентраторы напряжений, то в этих местах напряжения достигают большой

величины и даже может возникнуть трещина. Но так как пластичность металла высока, то в таком месте, в том числе в устье трещины, металл пластически деформируется, упрочняется, и процесс разрушения приостанавливается.

У неметаллов этого не наблюдается — когда напряжения превзойдут некоторую величину, произойдет разрушение.

Данными обстоятельствами обусловлено то, что металлы являются надежными конструкционными материалами.

7.2. Физическая природа деформации металлов

Деформацией называется изменение формы и размеров тела под действием напряжений. Напряжения и вызываемые ими деформации могут возникать при воздействии на тело внешних сил растяжения, сжатия и т. д., а также в результате фазовых (структурных) превращений, усадки и других протекающих в металле физико-химических процессов, связанных с изменением объема.

Деформация под действием напряжения может быть упругой и пластической (остаточной). Пластическая деформация происходит только под действием касательных напряжений, достаточных для необратимого перемещения атомов в кристаллической решетке.

Упругой называется деформация, полностью исчезающая после прекращения действия (снятия) вызвавших ее напряжений.

При упругой деформации происходит незначительное изменение расстояний между атомами в кристаллической решетке (рис. 7.1, а, б). С увеличением межатомных расстояний существенно возрастают силы взаимного притяжения атомов. При снятии напряжения под действием этих сил атомы возвращаются в исходное положение.

Если нормальные напряжения достигают значения сил межатомной связи, то произойдет хрупкое разрушение путем отрыва одной части объекта от другой (рис. 7.1, в, г). Упругую деформацию вызывают также и небольшие касательные напряжения (рис. 7.2, б).

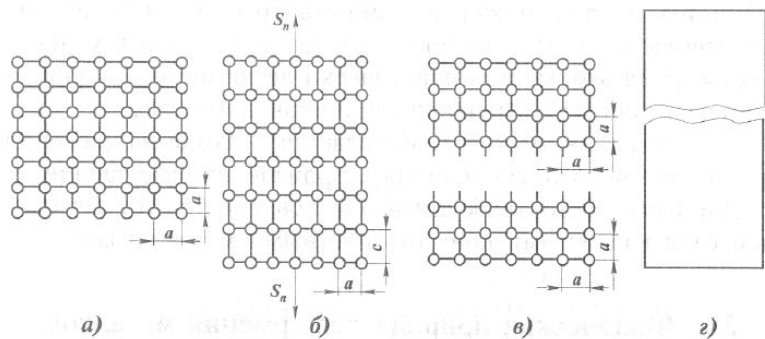


Рис. 7.1. Схема упругой деформации и хрупкого разрушения под действием нормальных напряжений: *a* – ненапряженная решетка металла; *б* – упругая деформация; *в, г* – хрупкое разрушение в результате отрыва

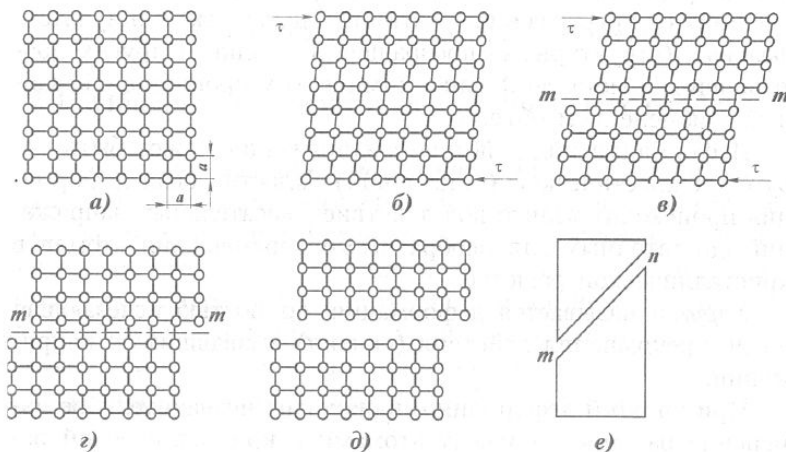


Рис. 7.2. Схема пластической деформации и пластического (вязкого) разрушения под действием касательных напряжений: *a* – ненапряженная решетка; *б* – упругая деформация; *в* – упругая и пластическая деформация; *г* – пластическая деформация, остаточные напряжения сняты; *д, е* – пластическое (вязкое) разрушение в результате сдвига

Пластической или остаточной называется деформация, остающаяся после прекращения действия вызвавших ее напряжений. При пластической деформации в кристаллической решетке металла под действием касательных напряжений проис-

ходит необратимое перемещение атомов (рис. 7.2, *г*). При небольшых напряжениях (рис. 7.2, *б*) атомы смещаются незначительно и после снятия напряжений возвращаются в исходное положение. При увеличении касательного напряжения наблюдается необратимое смещение атомов (рис. 7.2, *в*), то есть происходит пластическая деформация, причем сплошность тела не нарушается (рис. 7.2, *г*). В результате развития пластической деформации может произойти пластическое (вязкое) разрушение путем сдвига (рис. 7.2, *д, е*).

В кристаллической решетке сдвиг (скольжение) происходит по плоскостям и в направлениях с наиболее плотной упаковкой атомов. Эти плоскости, называемые плоскостями сдвига или скольжения, зависят от типа кристаллической решетки. Чем больше элементов сдвига в решетке, тем выше пластичность.

Деформация двойникованием представляет собой перестройку части кристалла в новое положение, зеркально симметричное по отношению к недеформированной части кристалла (рис. 7.3). Плоскость, по отношению к которой выполняется зеркальная симметрия, называется плоскостью двойникования. При двойниковании атомные плоскости сдвигаются параллельно плоскости двойникования на разные рас-

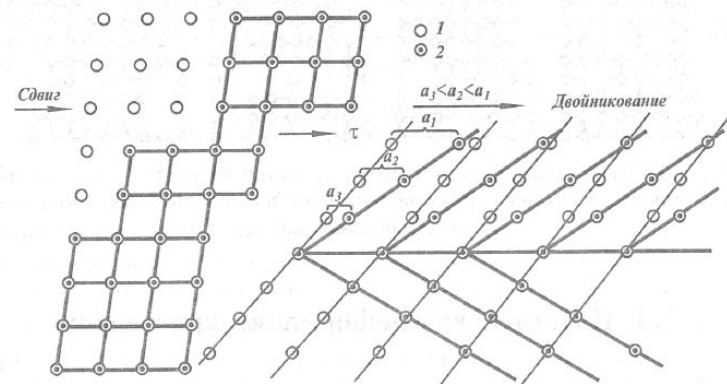
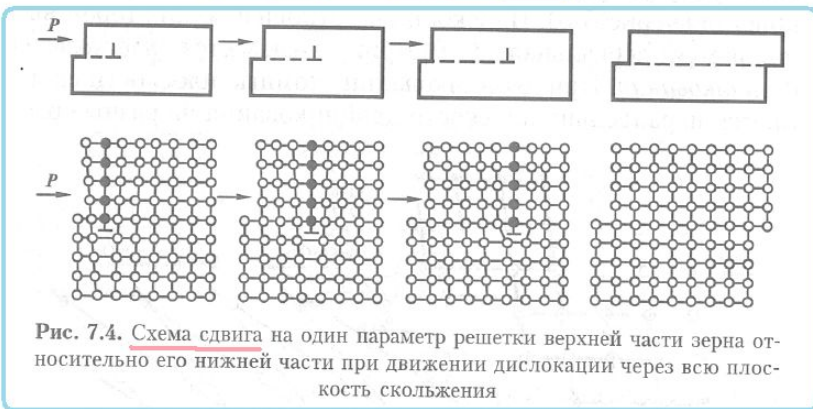


Рис. 7.3. Перемещение атомов при сдвиге (слева) и двойниковании (справа). Положение атомов до (1) и после (2) деформации

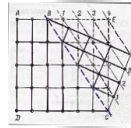
стояния. По сравнению со скольжением двойникование занимает второстепенное положение, деформация за счет двойникования всегда меньше деформации скольжения. Роль двойникования возрастает, если скольжение невозможно или затруднено. В металлах с ОЦК- и ГЦК-решетками двойникование наблюдается лишь при низких температурах и низких скоростях деформации. В металлах с ГПУ-решеткой, где немного систем скольжения, деформирование при нормальных условиях сопровождается двойникованием.

Дислокационный механизм пластической деформации. Атомы, расположенные в поле дислокации, возбуждены, их энергия повышена, они уже выведены из регулярных положений с минимальной свободной энергией. Такое состояние кристалла нестабильно. Достаточно приложить существенно меньшие напряжения, чем при синхронном сдвиге, чтобы ограниченная группа атомов, слегка сместившись, заняла новые устойчивые положения. Так совершается элементарный акт пластической деформации с затратой минимума энергии (рис. 7.4).

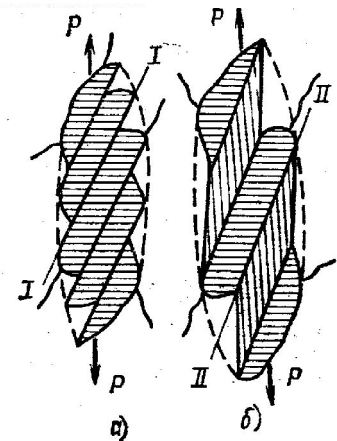


7.3. Пластическая деформация кристаллов

Деформация монокристалла под действием внешней нагрузки начинается в той системе, где касательное напряжение превысит критическое напряжение. Эту систему называ-



от главной. Первоначально дислокации плоскостям главной системы. При сдвиге они относительно друг друга скольжения. Пока скольжение идет, кристалл упрочняется слабо, по скольжения называют стадией легкого деформации скольжение распространяется и возникает множественное скопление дислокаций движущихся в пересекающихся направлениях, что создает сопротивление их движению, сложная структура. Как следствие - упрочнение.



Деформация поликристалла начинается сразу по нескольким системам скольжения и сопровождается изгибами и поворотами плоскостей скольжения. Из-за беспорядочного расположения зерен в поликристалле деформация отдельных зерен и распределение в них деформационных искажений неоднородны. С ростом деформации различие между зернами уменьшается и изменяется форма самих зерен, которые постепенно вытягиваются; плотность дефектов повышается настолько, что границы зерен становятся неотличимыми от деформированного металла. При значительных, свыше 40 %, деформациях образуется волокнистая структура.

С ростом деформации в зернах возникает преимущественная кристаллографическая ориентировка, которая называется текстурой деформации. Текстура появляется в результате одновременного деформирования зерен по нескольким системам скольжения и поворотов плоскостей скольжения.

Наклеп. Рассмотренная схема пластической деформации позволяет сделать вывод, что процесс сдвига в кристалле будет происходить тем легче, чем больше дислокаций будет в металле. Когда дислокации отсутствуют, сдвиг возможен только за счет одновременного смещения всей части кристалла. Как доказано выше, реальная прочность металлов зависит от плотности дислокаций при деформации. Достигнув минимального значения при некоторой плотности дислокации, реальная прочность начинает возрастать.



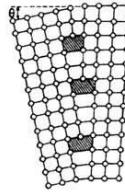
Рис. 7.5. Зависимость прочности от количества дислокаций и других дефектов кристаллической решетки (схема И.А. Одингга): 1 — чистые отожженные металлы; 2 — сплавы, упрочненные легированием, термической обработкой, пластической деформацией (наклеп) и т. п.

Техническая (реальная) прочность металлов в 10–1000 раз меньше, чем их теоретическая прочность, определяемая силами межатомного сцепления. Так, для железа теоретически вычисленное значение сопротивления отрыву $S_{от} = 21 \cdot 10^3$ МПа. Техническая же прочность $S_{от} = 700$ МПа. Такое большое различие объясняется тем, что теоретическая прочность соответствует идеальной бездефектной структуре металла. В реальных металлах всегда имеются дислокации и другие дефекты кристаллической решетки, включения, микротрещины, понижающие прочность и инициирующие разрушение (рис. 7.5).

Минимальную прочность имеют чистые отожженные металлы при плотности дислокаций около

$10^7–10^8$ см⁻². С уменьшением количества дислокаций прочность возрастает и может достигать теоретического значения. Так, например, у нитевидных металлических кристаллов «усов» толщиной 0,5–2 мкм и длиной до 10 мм структура практически бездефектна. Они имеют прочность, почти равную теоретической: $\sigma_v = 13\,500$ МПа. Увеличение размеров «усов» приводит к появлению дислокаций и резкому снижению прочности.

Наклепом называется изменение свойства металла в результате холодной пластической деформации. С увеличением степени пластической деформации повышаются прочность и твердость. Одновременно понижаются пластичность и вязкость металла, то есть происходит его охрупчивание. Наибо-



лее высокопрочным материалом в современной технике является нагартованная стальная проволока, получаемая в результате холодного волочения при степени деформации 80–90 % и имеющая временное сопротивление 3000–4000 МПа. Такая прочность не может быть достигнута легированием и термообработкой. В результате наклепа существенно изменяются физические и химические свойства металлов (например, повышаются электросопротивление, растворимость в кислотах, уменьшается теплопроводность).

Упрочнение при наклепе объясняется прежде всего тем, что с увеличением степени пластической деформации на несколько порядков возрастает число дислокаций. По теоретическим расчетам и экспериментальным данным в поликристаллическом отожженном металле число дислокаций составляет $10^6–10^8$, в сильно деформированном металле — до $10^{11}–10^{12}$ на см⁻². При увеличении числа дислокаций их свободное перемещение затрудняется взаимным влиянием. Упрочнение вызывается также торможением дислокаций в связи с измельчением блоков и зерен, искажением решетки металла, возникновением напряжений. Особо эффективными «барьерами» для дислокаций являются границы зерен и блоков. Дислокации могут тормозиться дисперсионными частицами, выделяющимися из твердого раствора при деформировании.

Сверхпластичность. В общем случае способность металла к значительной равномерной деформации без упрочнения называется сверхпластичностью. Действительно, почему нельзя продеформировать образец (например, растяжением) как угодно много? Во-первых, потому, что в процессе деформации металл наклепывается (размножение дислокаций) и теряет способность пластически деформироваться; во-вторых, например, при температурах выше температуры рекристаллизации образуется шейка (локальная деформация) и происходит разрушение образца.

Поэтому состояние сверхпластичности может быть достигнуто в специальных сплавах при соответствующей термообработке и особых условиях деформирования.

Сверхпластичная штамповка

Эта технология нашла широкое применение применительно к магниевым, алюминиевым, а также титановым сплавам. На рис. 1-5 показаны детали из титановых сплавов, полученные точной изотермической штамповкой. Благодаря однородной мелкозернистой структуре изотермическая штамповка в условиях сверхпластичности позволяет получить деталь за один переход, что позволяет в 2-5 раз снизить расход материала, на 25-30% уменьшить трудоемкость механической обработки, до 0.8 повысить коэффициент необрабатываемых поверхностей, заметно повысить надежность и ресурс изделий.

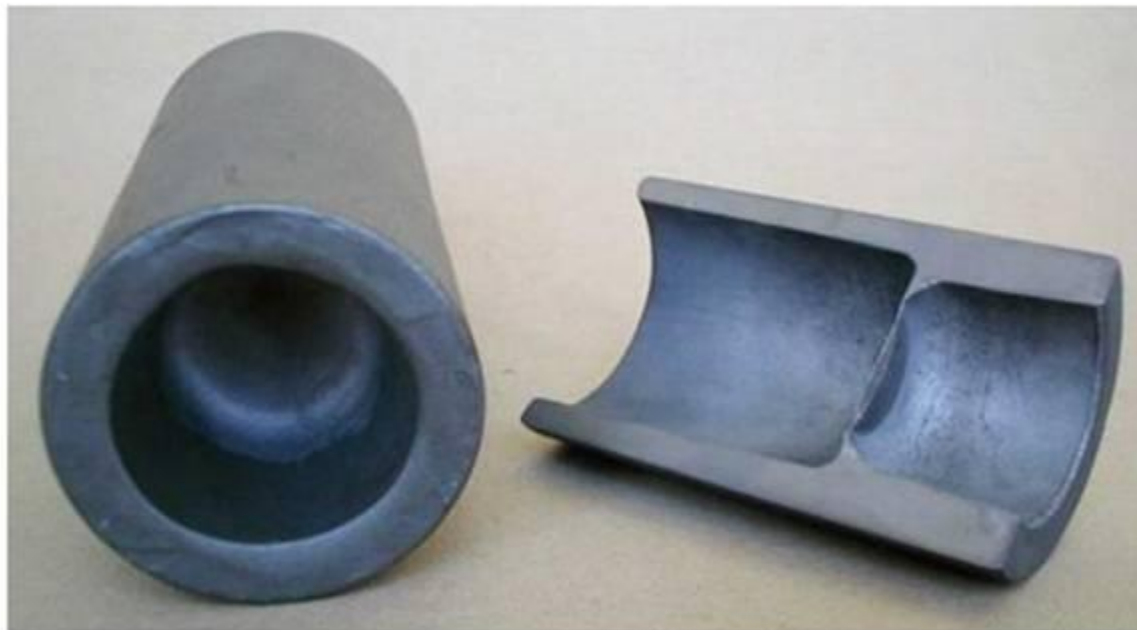


Рисунок 1. Деталь типа «стакан»

Нужно: достаточно высокие температуры (меньше $T_{пл}$),
мелкий размер зерна (меньше 20 мкм)
низкая скорость деформации



Рисунок 2. Диск с лопатками

7.4. Характеристики прочности и пластичности

Прочность — способность тела (металла) сопротивляться деформациям и разрушениям. Большинство технических характеристик прочности определяют в результате статического испытания на растяжение. На рис. 7.6 приведена диаграмма растяжения отожженной стали. При нагрузке, соответствующей начальной части диаграммы, материал испытывает только упругую деформацию. До точки *a*, определяющей конец прямолинейного участка диаграммы растяжения, соответствует предел пропорциональности.

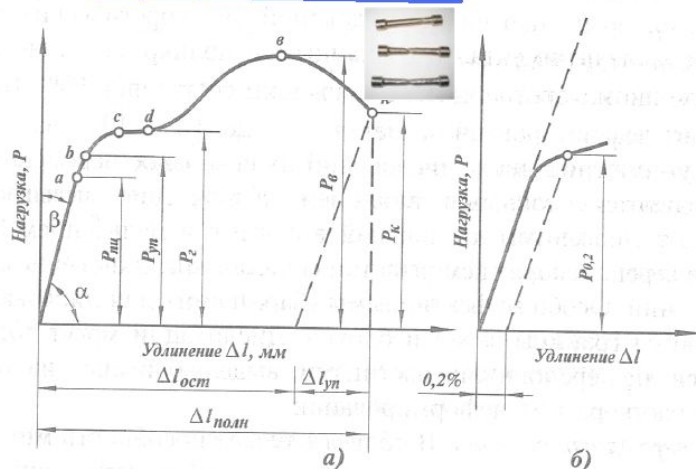


Рис. 7.6. Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали (а) и схема определения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ (б)

Теоретический предел пропорциональности — максимальное напряжение, до которого сохраняется линейная зависимость между напряжением и деформацией. Прямолинейную зависимость между напряжением и деформацией выражают законом Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

где $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%$ — относительная деформация; Δl — абсолютное удлинение; l_0 — начальная длина отрезка. Коэффици-

ент пропорциональности $E(\text{tg } \alpha)$, характеризующий упругие свойства материала, называется модулем нормальной упругости. При заданном напряжении с увеличением модуля уменьшается значение упругой деформации, то есть возрастает жесткость (устойчивость) конструкции. Поэтому модуль E также называют модулем жесткости. Значение модуля зависит от природы сплава и меняется незначительно при изменении его состава, структуры, термообработки. Например, для различных углеродистых и легированных сталей после любой обработки

$$E = 210 \text{ МПа.}$$

Теоретический предел упругости — максимальное напряжение, до которого образец получает только упругую деформацию $\sigma_{\text{уп}}$.

Из-за трудности определения истинных напряжений пользуются условными стандартными характеристиками прочности. Дело в том, что при определении условных напряжений площадь образца считается неизменной, но на самом деле при растяжении она все время уменьшается. Истинное напряжение получается при делении нагрузки на площадь, которую образец имел в тот же момент. Истинные напряжения больше условных во всей области пластического деформирования.

В повседневной практике пользуются условными напряжениями, которые достаточно точно характеризуют прочность и определяются проще, чем истинные. Условный предел упругости определяет напряжение, при котором пластическая деформация достигает некоторой малой величины. Часто используют величины остаточной деформации: 0,005; 0,01; 0,03 и 0,05 %. В обозначении условного предела упругости указывают значение остаточной деформации: $\sigma_{0,005}$; $\sigma_{0,01}$ и т. д.

Предел упругости — важная характеристика пружинных материалов, которые используются для упругих элементов приборов и машин.

Предел текучести — физический и условный — характеризует сопротивление материала небольшим пластическим деформациям.

Физический (истинный) предел текучести — напряжение, при котором происходит увеличение деформации при постоянной нагрузке:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}$$

На диаграмме растяжения (см. рис. 7.6) пределу текучести соответствует горизонтальный участок ($c-d$), когда наблюдается пластическая деформация (удлинение) — «течение» металла при постоянной нагрузке.

Условный предел текучести — напряжение, вызывающее остаточную деформацию, равную 0,2 % от начальной расчетной длины образца: $\sigma_{0,2}$.

При дальнейшем нагружении пластическая деформация все больше увеличивается, равномерно распределяясь по всему объему образца. В точке b , где нагрузка достигает максимального значения, начинается образование «шейки» — сужение поперечного сечения; деформация сосредоточивается на одном участке — из равномерной переходит в местную. В этот момент испытания напряжение называется временным сопротивлением.

Временное сопротивление разрыву — напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, которую выдерживает образец до разрушения: σ_B .

По своей физической сущности σ_B характеризует прочность как сопротивление значительной равномерной пластической деформации. За точкой b (см. рис. 7.6) вследствие развития шейки нагрузка уменьшается, в точке K при нагрузке P_K происходит разрушение образца.

Истинное сопротивление разрушению — максимальное напряжение, которое выдерживает материал в момент, предшествующий разрушению образца: $S_K = P_K / F_K$, где F_K — конечная площадь поперечного сечения образца в месте разрушения.

Истинные напряжения. Рассмотренные показатели прочности: σ_T , σ_B и другие, за исключением S_K , являются условными напряжениями, так как при их определении соответствующие нагрузки относят к начальной площади сечения образца F_0 , хотя последняя постепенно уменьшается по мере деформации образца. Более точное представление о напряжениях в образце дают диаграммы истинных напряжений (рис. 7.7). Истинные напряжения $S_i = P_i / F_i$ определяют по нагрузке P_i и площади поперечного сечения F_i в данный момент испытания. Примерно до точки b различие между истинными и условными напряжениями невелико и $S_B \approx \sigma_B$. Затем истинные напряжения увеличиваются, достигая максимального значения S_K в момент, предшествующий разрушению.

Пластичность — способность тела (металла) к пластической деформации, то есть способность получать остаточные изменения формы и размеров без нарушения сплошности. Это свойство используют при обработке металлов давлением. Характеристиками пластичности являются относительное удлинение и относительное сужение.

Относительное удлинение:

$$\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100 \% = \frac{\Delta l_{\text{ост}}}{l_0} \cdot 100 \%,$$

где l_K, l_0 — соответственно конечная и начальная длина образца; $\Delta l_{\text{ост}}$ — удлинение образца.

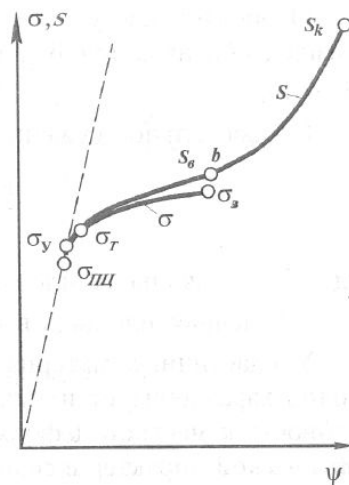


Рис. 7.7. Диаграмма истинных (S) и условных (σ) напряжений; ψ — поперечное сужение образца

Относительное удлинение, определяемое на длинных образцах, обозначается δ_{10} , на коротких — δ_5 , причем всегда $\delta_5 < \delta_{10}$.

Относительное сужение:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100 \%,$$

где F_0 — начальная площадь поперечного сечения образца; F_k — конечная площадь в шейке после разрыва.

У пластичных материалов относительное сужение более точно характеризует их максимальную пластичность — способность к местной деформации — и нередко служит технологической характеристикой при листовой штамповке.

7.5. Твердость

Твердостью металла называют его свойство оказывать сопротивление пластической деформации при контактом воздействии (внедрении) стандартного тела-наконечника (индентора) на поверхностные слои материала. Измерение твердости вследствие быстроты и простоты осуществления получило широкое применение для контроля качества изделий. Испытание на твердость — основной метод оценки качества термообработки изделия.

Определение твердости по методу Бринелля. Метод основан на том, что в плоскую поверхность под нагрузкой P внедряют стальной шарик диаметром D (рис. 7.8, а). Число твердости НВ определяется отношением нагрузки P к сферической поверхности отпечатка — лунки (шарового сегмента) E диаметром d :

$$НВ = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Диаметр шарика выбирают в зависимости от толщины изделия: $D = 10; 5; 2,5$ мм.

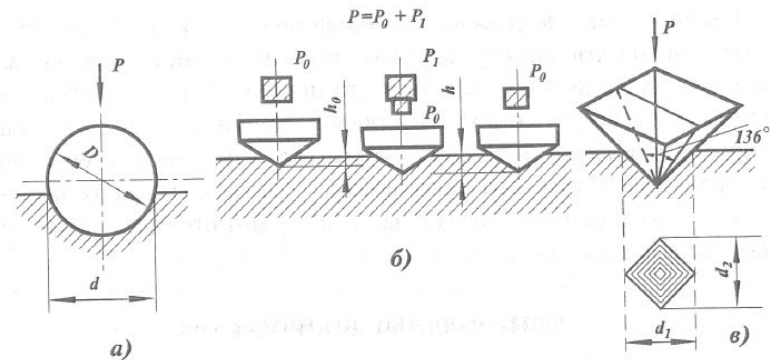


Рис. 7.8. Схемы определения твердости по Бринеллю (а), по Роквеллу (б), по Виккерсу (в)

Метод Роквелла (обобщенно обозначается символом HR) основан на статическом вдавливании в испытываемую поверхность наконечника под определенной нагрузкой (рис. 7.8, б). В качестве наконечников для материалов с твердостью до 450 HR используют стальной шарик. В этом случае твердость обозначают как HRB. В зависимости от нагрузки на наконечник при использовании алмазного конуса твердость обозначают как HRA и HRC.

Твердость по методу Виккерса определяют путем статического вдавливания в испытываемую поверхность алмазной четырехгранной пирамиды с углом $\alpha = 136^\circ$ между противоположными гранями (рис. 7.8, в). Число твердости определяют по формуле

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2},$$

где d — диагональ отпечатка; $P = 5-100$ кгс.

При испытании измеряют обе диагонали (d_1 и d_2) отпечатка с точностью до 0,001 мм при помощи микроскопа, который является составной частью прибора Виккерса. Числа твердости определяют как среднеарифметическое значение $(d_1 + d_2)/2$ обеих диагоналей.

Методы испытания материалов

Метод Роквелла

Основан на вдавливании в поверхность наконечника под определенной нагрузкой (рисунок 3 б)

Индентор для мягких материалов (до HB 230) – стальной шарик диаметром 1/16" (Ø1,6 мм), для более твердых материалов – конус алмазный.

Нагружение осуществляется в два этапа. Сначала прикладывается предварительная нагрузка P_0 (10 кгс) для плотного соприкосновения наконечника с образцом. Затем прикладывается основная нагрузка P_1 , в течение некоторого времени действует общая рабочая нагрузка P . После снятия основной нагрузки определяют значение твердости по глубине остаточного вдавливания наконечника h под нагрузкой P_0 . В зависимости от природы материала используют три шкалы твердости (таблица 1)

Таблица 1 — Шкалы для определения твердости по Роквеллу

Шкала	Обозначение	Индентор	Нагрузка, кг			Область применения
			P_0	P_1	P_2	
A	HRA	Алмазный конус	10	50	60	Для особо твердых материалов
B	HRB	Стальной закаленный шарик	10	90	100	Для относительно мягких материалов
C	HRC	Алмазный конус	10	140	150	Для относительно твердых материалов

Метод микротвердости предназначен для определения твердости отдельных структурных составляющих и фаз сплавов (например, зерен феррита в стали), очень тонких поверхностных слоев (сотые доли миллиметра). По существу метод микротвердости не отличается от метода Виккерса. Различие состоит лишь в том, что наконечник — четырехгранная пирамида — имеет меньшие размеры, и нагрузки при вдавливании такой пирамиды составляют от 5 до 500 гс.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова природа различий в механических свойствах металлов и неметаллов?
2. В чем заключается механизм деформации металлов?
3. Каковы различия в деформациях монокристалла и поликристалла?
4. С какой целью в технике может использоваться наклеп и какова природа его образования?
5. Каким образом определяют основные механические характеристики металлов?

Глава 8

ПЛАСТИЧНОЕ И ХРУПКОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛОВ

8.1. Разрушение металлов

Под разрушением понимают процесс зарождения и развития в металле трещин, приводящий к разделению его на части. Разрушение происходит в результате или развития нескольких трещин, или слияния рядом расположенных трещин в одну магистральную трещину, по которой происходит полное разрушение.

Обычно сопротивление деформации объединяют в общее понятие прочность, а сопротивление разрушению — надеж-

ность. Если разрушение происходит не за один, а за многие акты нагружения, причем за каждый акт происходит микро-разрушение, то это характеризует долговечность материала. Очевидно, что высококачественный конструкционный материал должен быть одновременно прочным, надежным и долговечным.

Разрушение может быть хрупким и вязким. Механизм зарождения трещин одинаков как при хрупком, так и при вязком разрушении. Возникновение микротрещин чаще происходит благодаря скоплению движущихся дислокаций перед препятствием, например перед границами блоков и зерен, перед слиянием дислокаций и т. д. При большой плотности дислокаций происходит их слияние с образованием микротрещины. Трещина образуется в плоскости, перпендикулярной плоскости скольжения, когда плотность дислокаций достигает 10^{10} – 10^{13} см⁻². Возможны и «безбарьерные» механизмы образования трещин, например в результате взаимодействия дислокаций в кристаллической решетке (рис. 8.1, б).

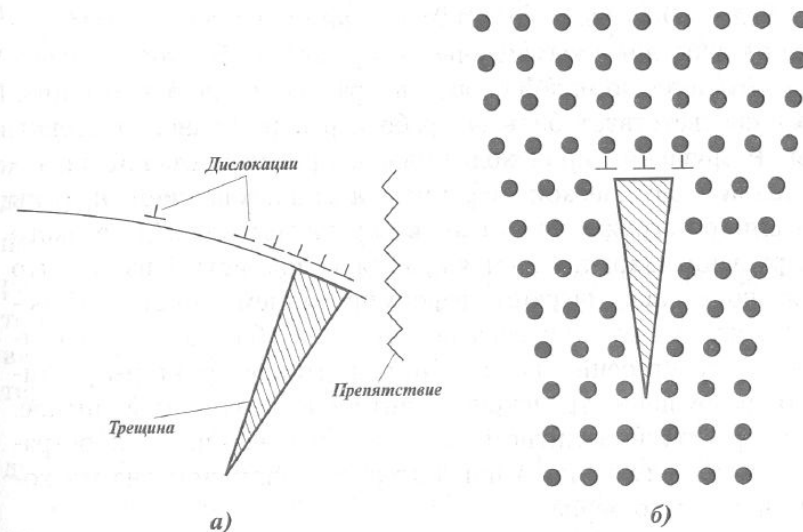


Рис. 8.1. Скопление дислокаций у препятствий (а); слияние дислокаций и образование зародышевой трещины (б)

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ (ПЕРЕМЕННЫХ) НАГРУЗКАХ

Многие детали машин испытывают много раз повторяющиеся нагрузки (рессоры, в двигателе).

Процесс постепенного накопления повреждения в металле, образование трещин – называют усталостью, а свойство противостоять усталости – выносливостью (рис. 11).

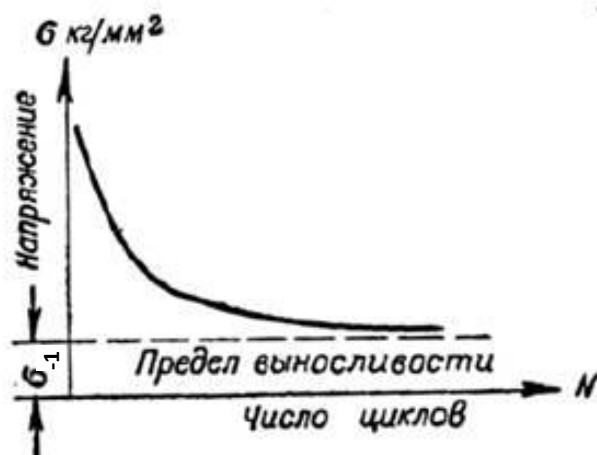


Рис. 11. Кривая усталости

При знакопеременных нагрузках разрушение происходит постепенно при напряжениях меньших предела прочности. Этот процесс постепенного разрушения (усталости) заключается в том, что поверхность, как наиболее нагруженная часть сечения, претерпевает микродеформацию, а затем в наклепанной (упрочненной деформацией) зоне возникает трещина, которая постепенно развивается. Усталостное разрушение происходит в три этапа: I – накопление деформацией; II – распространение трещины; III – долом.

Оценивается эта характеристика величиной σ_{-1} (предел выносливости) – количество циклов нагружения до появления опасности разрушения. Например, железнодорожные рельсы по прошествии некоторого времени нужно менять, чтобы не произошло катастрофического разрушения.

Хрупкое разрушение происходит путем отрыва под действием нормальных растягивающих напряжений, когда они достигают значения сопротивления отрыву. До разрушения материал испытывает упругую деформацию, иногда — небольшую пластическую деформацию. Характеристикой хрупкого разрушения является сопротивление отрыву. Для хрупкого разрушения характерным является кристаллический излом, обычно по границам зерен, плоскость разрушения перпендикулярна к нормальным растягивающим напряжениям. Хрупкое разрушение имеет «ручьеистое» строение поверхности излома.

Скорость распространения хрупкой трещины велика — близка к скорости звука. Поэтому хрупкое разрушение называют внезапным или катастрофическим разрушением.

В реальных материалах обычно происходит не абсолютно хрупкое разрушение, а микрoplastическое. Когда материал находится в упругодеформированном состоянии, у вершины трещины из-за концентрации напряжений происходит пластическая микродеформация.

Вязкое (пластическое) разрушение происходит путем среза под действием касательных напряжений. Вязкое разрушение обусловлено малой скоростью распространения трещины. Ему соответствует большая работа распространения трещины. Разрушение происходит после предварительной значительной пластической деформации с поглощением энергии внешнего нагружения за счет вязкости металла. Для вязкого разрушения характерным является волокнистый излом, что связано с пластическим деформированием металла. Плоскость излома расположена под углом. Наблюдается «чашечное» микростроение излома. По виду микроструктуры различают разрушение транскристаллитное и интеркристаллитное. При транскристаллитном разрушении трещина распространяется по телу зерна, а при интеркристаллитном она проходит через тело зерна.

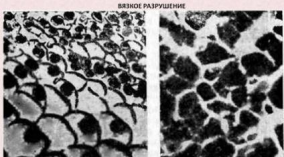


Рис. 48. Схематический вид поверхности разрушения:
а — хрупкое; б — вязкое

8.2. Факторы, влияющие на пластичное и хрупкое состояние

Вязкость — способность материала поглощать механическую энергию внешних сил за счет пластической деформации. По физическому смыслу вязкость — энергетическая характеристика и выражается в единицах работы, например в Дж.

Вязкость металлов и сплавов определяется их химическим составом, термической обработкой и другими внутренними факторами. Наряду с этим вязкость зависит от условий, в которых находится металл при работе в изделии. При определенных условиях один и тот же металл будет находиться в пластичном (вязком) состоянии, при других — он перейдет в хрупкое состояние. Такими условиями являются: температура, скорость нагружения, наличие концентраторов напряжения, вид напряженного состояния, масштабный фактор.

Влияние температуры. Предел текучести σ_T существенно изменяется с температурой, тогда как на $S_{от}$ (сопротивление отрыву) температура практически не влияет. При температуре T_B (верхний порог хрупкости или ломкости) $\sigma_T < S_{от}$, при нагружении сначала произойдет пластическое деформирование, а затем разрушение. Следовательно, металл будет находиться в вязком состоянии. При температурах T_H (нижний порог хрупкости или хладноломкости) $S_{от} < \sigma_T$ металл будет разрушаться без предварительной пластической деформации, то есть будет находиться в хрупком состоянии. Переход от вязкого в хрупкое состояние происходит в критическом интервале температур $T_B - T_H$.

Хладноломкостью называют склонность металла к переходу в хрупкое состояние при понижении температуры.

Хладноломкими являются железо, вольфрам, цинк и другие металлы, имеющие ОЦК- и ГПУ- решетки. Металлы и сплавы с ГЦК- решеткой не склонны к хладноломкости; такие металлы можно использовать в криогенной технике.

$KCU, \text{Мдж/м}^2$

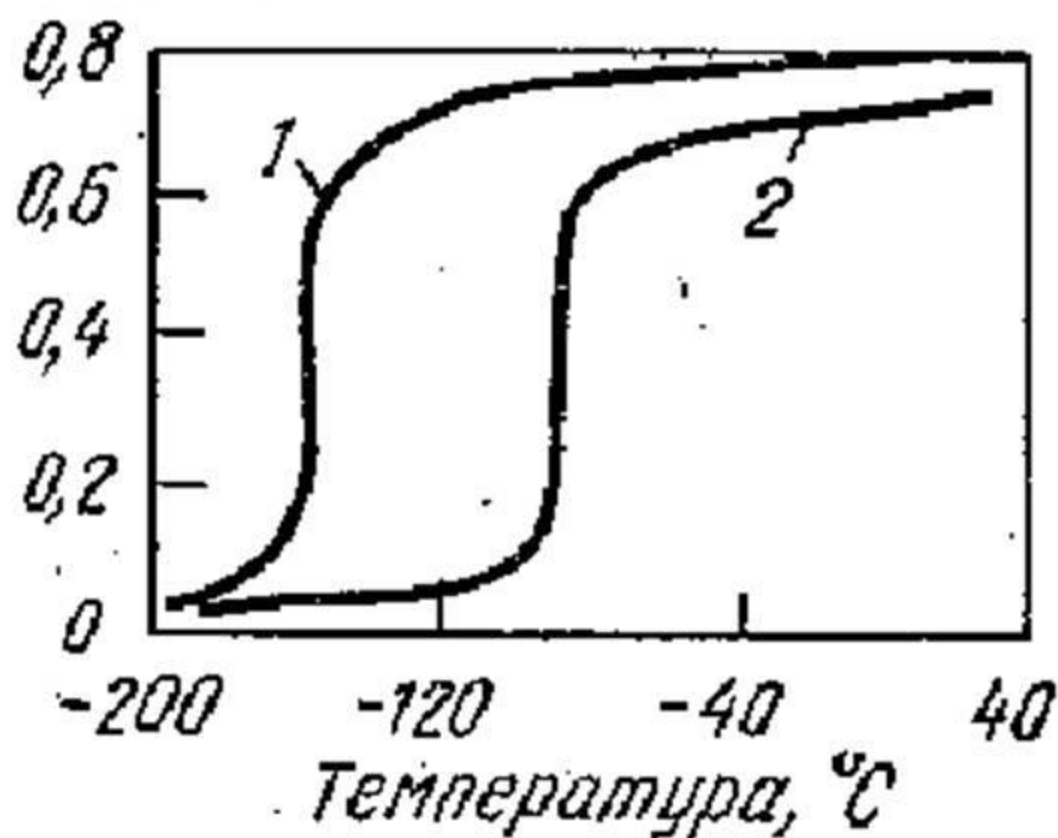


Рис. 49. Зависимость порога хладоломкости от скорости нагружения:

1 — скорость v_1 ; 2 — скорость v_2 ; $v_1 < v_2$

Далее читаем темы по Фетисову, Гарифуллину
8.2, 8.3, 9.1, 9.2, 9.3 (в 9.3 кроме перитектического превращения)

Также тема из книги Травин О.В. «Материаловедение»
Пластические массы стр. 330-343 (терморреактивные
пластмассы не нужно).

Из Плошкина В.В. «Материаловедение» разделы:

Резины

Клеи и герметики

Стекло

Композиционные материалы

Смотрите вопросы на экзамен.