

Краткая аннотация

Конспект лекций составлен по учебникам:

1. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.В. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
2. Гуляев А.п. Металловедение. М.: Metallurgy. 1987 г., 646 с.
3. Б.Н. Арзамасов и др. Материаловедение. М.: Машиностроение. 2005г., 648с.
4. Геллер Ю.А. Материаловедение: Учебное пособие для вузов. – 6-е изд. перераб. и доп. – М.: Metallurgy, 1989. – 455 с.

Во время проведения лекций используется мультимедийный демонстрационный комплекс по дисциплинам: «Материаловедение» и «Материаловедение и ТКМ».

Л.1. Введение в материаловедение. Кристаллическое строение металлов. Дефекты кристаллического строения металлов. Методы исследования металлов

Материаловедение – это наука, изучающая закономерности строения и свойств материалов в зависимости от их состава и условий обработки. К материалам относят металлы и их сплавы (железо и сплавы на его основе, тугоплавкие металлы, алюминий и сплавы на его основе, магний и сплавы на его основе, медь и сплавы на ее основе, антифрикционные сплавы, композиционные и порошковые материалы), и неметаллические материалы (полимеры, пластические массы, композиционные материалы с неметаллической матрицей, резиновые материалы, клеящиеся материалы и герметики, неорганические материалы).

В огромном ряду материалов, с незапамятных времен известных человеку и широко используемых им в своей жизни и деятельности, металлы всегда занимали особое место. Причина этого – в особых свойствах металлов, выгодно отличающих их от других материалов и делающих во многих случаях незаменимыми.

Металлы – один из классов конструкционных материалов, характеризующийся определенным набором свойств:

- «металлический блеск» (хорошая отражательная способность);
- пластичность;
- высокая теплопроводность;
- высокая электропроводность.

Данные свойства обусловлены особенностями строения металлов. Согласно теории металлического состояния, металл представляет собой вещество, состоящее из положительных ядер, вокруг которых по орбитали вращаются электроны. На последнем уровне число электронов невелико и они слабо связаны с ядром. Эти электроны имеют возможность перемещаться по всему объему металла, т.е. принадлежать целой совокупности атомов.

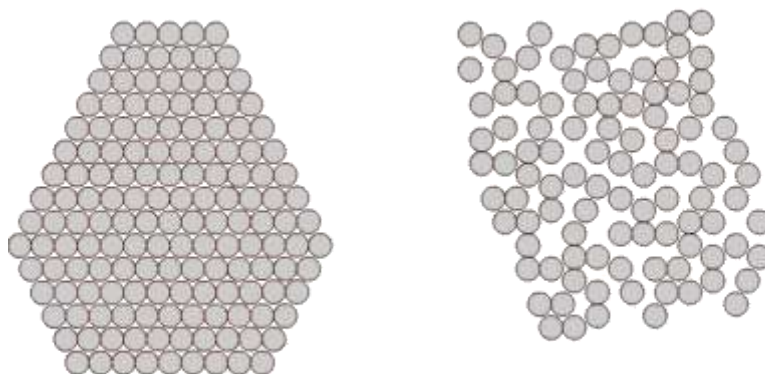
Металловедение устанавливает связь между составом, структурой и свойствами металлов и сплавов и изучает закономерности их изменения при тепловых, химических, механических, электромагнитных и радиоактивных воздействиях.

В твердых телах атомы могут размещаться в пространстве двумя способами:

Беспорядочное расположение атомов, когда они не занимают определенного места друг относительно друга. Такие тела называются аморфными. Аморфные вещества обладают формальными признаками твердых тел, т.е. они способны сохранять постоянный объем и форму. Однако они не имеют определенной температуры плавления или кристаллизации.

Вещества, у которых наблюдается упорядоченное расположение атомов, когда атомы занимают в пространстве вполне определенные места, называют кристаллическими. Атомы совершают относительно своего среднего положения колебания с частотой около 10^{13} Гц. Амплитуда этих колебаний пропорциональна температуре. Благодаря упорядоченному расположению атомов в пространстве, их центры можно соединить воображаемыми прямыми линиями. Совокупность таких пересекающихся линий представляет пространственную решетку, которую называют кристаллической решеткой.

Кристаллические твердые тела состоят из кристаллических зерен - кристаллитов. В соседних зернах кристаллические решетки повернуты относительно друг друга на некоторый угол. В кристаллитах соблюдаются ближний и дальний порядки. Это означает наличие упорядоченного расположения и стабильности как окружающих данный атом ближайших его соседей (ближний порядок), так и атомов, находящихся от него на значительных расстояниях вплоть до границ зерен (дальний порядок).



а)

б)

Рис. 1.1. Расположение атомов в кристаллическом (а) и аморфном (б) веществе

Все металлы являются кристаллическими телами, имеющими определенный тип кристаллической решетки, состоящей из малоподвижных положительно заряженных ионов, между которыми движутся свободные электроны (так называемый электронный газ). Такой тип структуры называется металлической связью.

Тип решетки определяется формой элементарного геометрического тела, многократное повторение которого по трем пространственным осям образует решетку данного кристаллического тела.

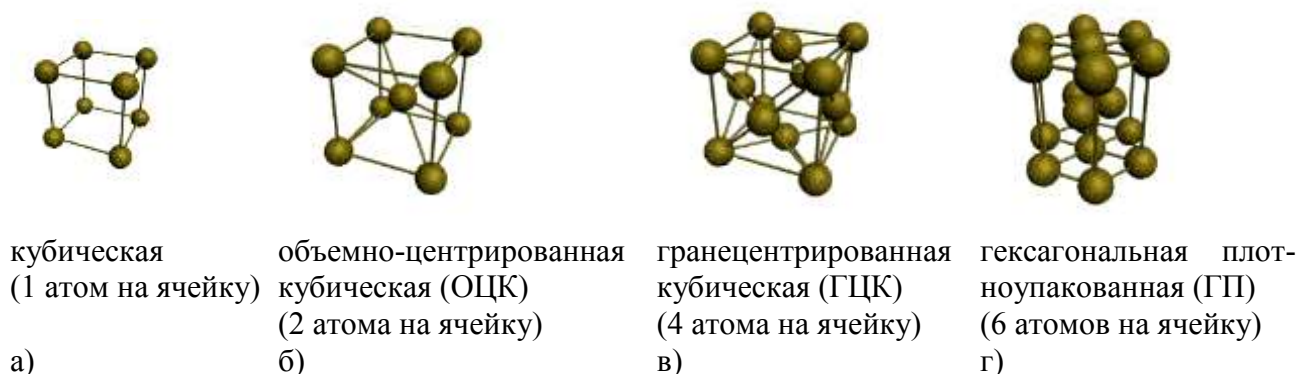


Рис. 1.2. Основные типы кристаллических решеток металлов

Металлы имеют относительно сложные типы кубических решеток - объемно центрированная (ОЦК) и гранецентрированная (ГЦК) кубические решетки.

Основу ОЦК-решетки составляет элементарная кубическая ячейка (рис. 1.2,б), в которой положительно заряженные ионы металла находятся в вершинах куба, и еще один атом в центре его объема, т. е. на пересечении его диагоналей. Такой тип решетки в определенных диапазонах температур имеют железо, хром, ванадий, вольфрам, молибден и др. металлы.

У ГЦК-решетки (рис. 1.2, в) элементарной ячейкой служит куб с центрированными гранями. Подобную решетку имеют железо, алюминий, медь, никель, свинец и др. металлы.

Третьей распространенной разновидностью плотноупакованных решеток является гексагональная плотноупакованная (ГПУ, рис. 1.2, г). ГПУ-ячейка состоит из отстоящих друг от друга на параметр с параллельных центрированных гексагональных оснований. Три иона

(атома) находятся на средней плоскости между основаниями.

У гексагональных решеток отношение параметра c/a всегда больше единицы. Такую решетку имеют магний, цинк, кадмий, бериллий, титан и др.

Компактность кристаллической решетки или степень заполненности ее объема атомами является важной характеристикой. Она определяется такими показателями как параметр решетки, число атомов в каждой элементарной ячейке, координационное число и плотность упаковки. Параметр решетки - это расстояние между атомами по ребру элементарной ячейки. Параметры решетки измеряются в нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м} = 10 \text{ \AA}$). Параметры кубических решеток характеризуются длиной ребра куба и обозначаются буквой a . Параметры a кубических решеток металлов находятся в пределах от 0,286 до 0,607 нм. Для металлов с гексагональной решеткой a лежит в пределах 0,228-0,398 нм, а c в пределах 0,357- 0,652 нм. Параметры кристаллических решеток металлов могут быть измерены с помощью рентгеноструктурного анализа.

При подсчете числа атомов в каждой элементарной ячейке следует иметь в виду, что каждый атом входит одновременно в несколько ячеек. Например, для ГЦК-решетки, каждый атом, находящийся в вершине куба, принадлежит 8 ячейкам, а атом, центрирующий грань, двум. И лишь атом, находящийся в центре куба, полностью принадлежит данной ячейке. Таким образом, ОЦК- и ГЦК-ячейки содержат соответственно 2 и 4 атома. Под координационным числом понимается количество ближайших соседей данного атома.

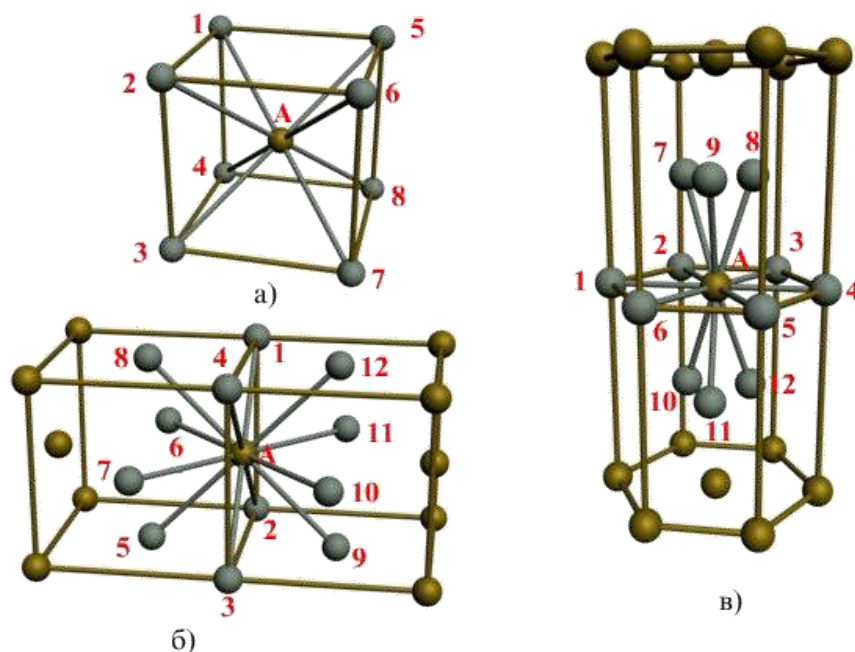


Рис. 1.3. Координационное число в различных кристаллических решетках для атома А:
а) - объемноцентрированная кубическая (К8); б) - гранецентрированная кубическая (К12);
в) - гексагональная плотноупакованная (Г12)

Плотность упаковки представляет собой отношение суммарного объема, занимаемого собственно атомами в кристаллической решетке, к ее полному объему. Различные типы кристаллических решеток имеют разную плотность упаковки атомов. В ГЦК решетке атомы занимают 74 % всего объема кристаллической решетки, а межатомные промежутки («поры») 26 %. В ОЦК решетке атомы занимают 68 % всего объема, а «поры» 32 %. Компактность решетки зависит от особенностей электронной структуры металлов и характера связи между их атомами. От типа кристаллической решетки сильно зависят свойства металла. Упорядоченность кристаллического строения в пространственной решетке позволяет выделить отдельные кристаллографические направления и плоскости. Кристаллографические направления - это характерные прямые линии, выходящие из точки отсчета, вдоль которых в кристаллической решетке располагаются атомы. Точками отсчета, могут служить вершины куба, а кристаллографическими направлениями - его ребра и диагонали, а также диагонали граней

(рис. 1.4, а).

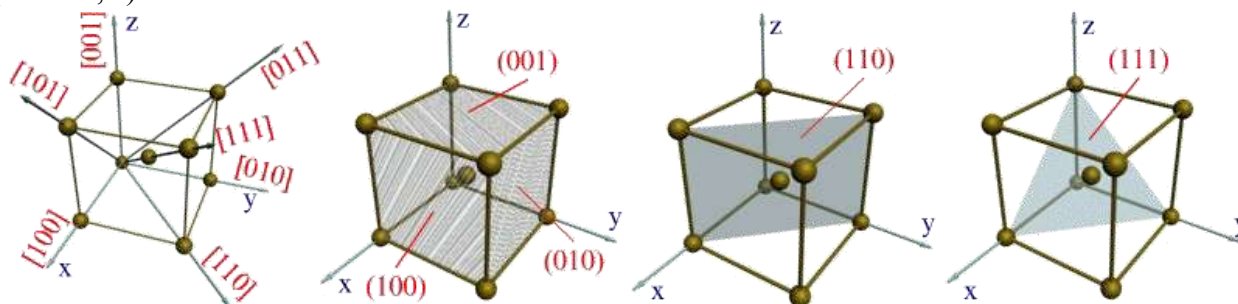


Рис. 1.4. Кристаллографические направления и плоскости в кристаллической решетке:

- а) - основные направления и их обозначение;
 б), в), г) - основные плоскости и их обозначение

Анизотропия в кристаллах. Под анизотропией понимается неодинаковость механических и других свойств в кристаллических телах вдоль различных кристаллографических направлений. Она является естественным следствием кристаллического строения, так как на различных кристаллографических плоскостях и вдоль различных направлений плотность атомов различна. Поскольку механические, физические и химические свойства вдоль различных направлений зависят от плотности находящихся на них атомов, то перечисленные свойства вдоль различных направлений в кристаллических телах должны быть неодинаковыми. Анизотропия проявляется только в пределах одного монокристалла или зерна-кристаллита. В поликристаллических телах она не наблюдается из-за усреднения свойств по каждому направлению для огромного количества произвольно ориентированных друг относительно друга зерен. Поэтому реальные металлы являются квазиизотропными телами, т. е. псевдоизотропными.

Аллотропия металлов. Некоторые металлы, например, железо, титан, олово и др. способны по достижении определенных температур изменять кристаллическое строение, т. е. изменять тип элементарной ячейки своей кристаллической решетки. Это явление получило название аллотропии или полиморфизма, а сами переходы от одного кристаллического строения к другому называются аллотропическими или полиморфными. Разные аллотропические формы металлов обозначаются буквами греческого алфавита, при этом низкотемпературные модификации обозначаются буквой а, а последующие в порядке роста температур - буквами b, g, d и т. д. Аллотропическими формами железа являются: до 911°C - альфа-железо (a-Fe), имеющее ОЦК-решетку, от 911°C до 1392 °C - гамма-железо (g -Fe) с решеткой ГЦК и от 1392°C до 1539 °C т. е. до температуры плавления - снова a-Fe с решеткой ОЦК, однако, чтобы отличить его от низкотемпературной модификации, его принято называть дельта-железом (d -Fe). Известное в практике так называемое немагнитное бета-железо (b -Fe) самостоятельной аллотропической формой не является, так как имеет такую же, как у a-Fe ОЦК-решетку и отличается от него только отсутствием магнитных свойств, которые оно теряет при 768°C (точка Кюри).

Дефекты кристаллической решетки металла

Кристаллическая решетка, в которой отсутствуют нарушения сплошности и все узлы заполнены однородными атомами, называется идеальной кристаллической решеткой металла. В решетке реального металла могут находиться различные дефекты. Все дефекты кристаллической решетки принято делить на точечные, линейные, поверхностные и объемные.

Точечные дефекты соизмеримы с размерами атомов. К ним относятся вакансии, т. е. незаполненные узлы решетки, межузельные атомы данного металла (рис 1.8), примесные атомы замещения, т. е. атомы, по диаметру соизмеримые с атомами данного металла и примесные атомы внедрения, имеющие очень малые размеры и поэтому находящиеся в междоузлиях (рис 1.9). Влияние этих дефектов на прочность металла может быть различным в зависи-

мости от их количества в единице объема и характера.

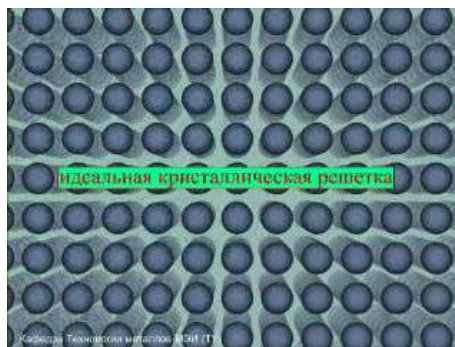


Рис. 1.8. Схема образования пары вакансия-внедренный атом

Рис. 1.9. Примесные атомы внедрения и замещения

Линейные дефекты имеют длину, значительно превышающую их поперечные размеры. К ним относятся дислокации, т. е. дефекты, образующиеся в решетке в результате смещений кристаллографических плоскостей. Дислокации бывают двух видов. Наиболее характерной является краевая дислокация (рис. 1.10). Она образуется в результате возникновения в решетке так называемой полуплоскости или экстраплоскости.

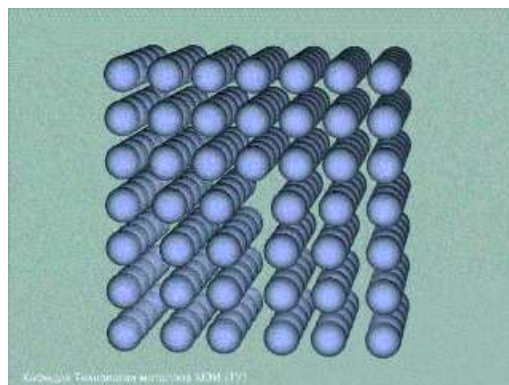


Рис. 1.10. Схема краевой дислокации в идеальном кристалле

Нижний ряд экстраплоскости собственно и принято называть дислокацией.

Другим типом дислокации является винтовая дислокация, которая представляет собой некоторую условную ось внутри кристалла, вокруг которой закручены атомные плоскости (рис.1.11).

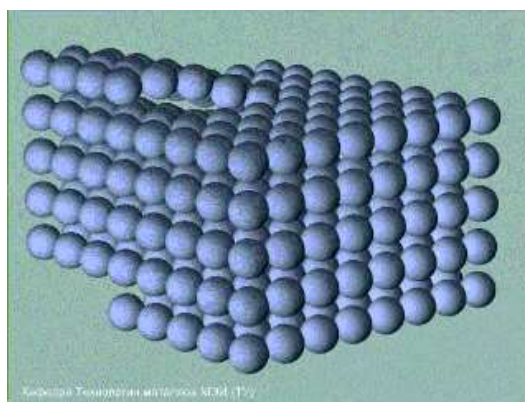


Рис. 1.11. Схема винтовой дислокации

В винтовой дислокации, так же как в краевой, существенные искажения кристаллической решетки наблюдаются только вблизи оси, поэтому такой дефект может быть отнесен к линейным. Дислокации обладают высокой подвижностью, поэтому существенно уменьшают прочность металла, так как облегчают образование сдвигов в зернах-кристаллитах под действием приложенных напряжений. Дислокационный механизм сдвиговой пластической де-

формации внутри кристаллов может привести к разрушению изделия. Таким образом, дислокации непосредственно влияют на прочностные характеристики металла. Для оценки этого влияния используется плотность дислокаций, под которой принято понимать отношение суммарной длины дислокаций к объему содержащего их металла. Плотности дислокаций измеряется в см⁻² или м⁻². Максимальная плотность дислокаций, может составить 10¹³ см⁻². При дальнейшем росте плотности дислокаций происходит разрушение металла.

Поверхностные дефекты включают в себя главным образом границы зерен (рис.1.13). На границах кристаллическая решетка сильно искажена. В них скапливаются перемещающиеся изнутри зерен дислокации. Из практики известно, что мелкозернистый металл прочнее крупнозернистого. Так как у последнего меньше суммарная протяженность (площадь) границ. То можно сделать вывод, что поверхностные дефекты способствуют повышению прочности металла. Поэтому создано несколько технологических способов получения мелкозернистых сплавов.

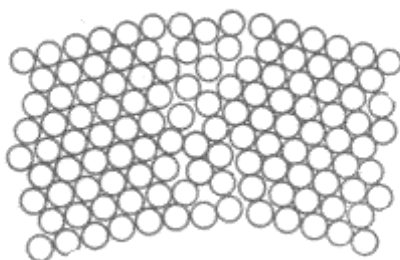


Рис.1.13. Структура границы двух соседних кристаллических зерен

Объемные дефекты кристаллической решетки включают трещины и поры. Наличие данных дефектов, уменьшая плотность металла, снижает его прочность. Кроме того, трещины являются сильными концентраторами напряжений, в десятки и более раз повышающими напряжения создаваемые в металле рабочими нагрузками. Последнее обстоятельство наиболее существенно влияет на прочность металла.

Методы исследования металлов

А. Определение химического состава. Используются методы количественного анализа.

1. Если не требуется большой точности, то используют спектральный анализ. Спектральный анализ основан на разложении и исследовании спектра электрической дуги или искры, искусственно возбуждаемой между медным электродом и исследуемым металлом. Зажигается дуга, луч света через призмы попадает в окуляр для анализа спектра. Цвет и концентрация линий спектра позволяют определить содержание химических элементов. Используются стационарные и переносные стилоскопы.

2. Более точные сведения о составе дает рентгеноспектральный анализ. Проводится на микроанализаторах. Позволяет определить состав фаз сплава, характеристики диффузионной подвижности атомов.

Б. Изучение структуры. Различают макроструктуру, микроструктуру и тонкую структуру.

1. Макроструктурный анализ – изучение строения металлов и сплавов невооруженным глазом или при небольшом увеличении, с помощью лупы. Осуществляется после предварительной подготовки исследуемой поверхности (шлифование и травление специальными реактивами). Позволяет выявить и определить дефекты, возникшие на различных этапах производства литых, кованных, штампованных и катанных заготовок, а также причины разрушения деталей. Устанавливают: вид излома (вязкий, хрупкий); величину, форму и расположение зерен и дендритов литого металла; дефекты, нарушающие сплошность металла (усадочную пористость, газовые пузыри, раковины, трещины); химическую неоднородность металла, вызванную процессами кристаллизации или созданную термической и химико-

термической обработкой; волокна в деформированном металле.

2. Микроструктурный анализ – изучение поверхности при помощи световых микроскопов. Увеличение – 50...2000 раз. Позволяет обнаружить элементы структуры размером до 0,2 мкм. Образцы – микрошлифы с блестящей полированной поверхностью, так как структура рассматривается в отраженном свете. Наблюдаются микротрещины и неметаллические включения. Для выявления микроструктуры поверхность травят реактивами, зависящими от состава сплава. Различные фазы протравливаются неодинаково и окрашиваются по разному. Можно выявить форму, размеры и ориентировку зерен, отдельные фазы и структурные составляющие. Кроме световых микроскопов используют электронные микроскопы с большой разрешающей способностью. Изображение формируется при помощи потока быстро летящих электронов. Электронные лучи с длиной волны $(0,04...0,12) \cdot 10^{-8}$ см дают возможность различать детали объекта, по своим размерам соответствующие межатомным расстояниям. Просвечивающие микроскопы. Поток электронов проходит через изучаемый объект. Изображение является результатом неодинакового рассеяния электронов на объекте. Различают косвенные и прямые методы исследования. При косвенном методе изучают не сам объект, а его отпечаток – кварцевый или угольный слепок (реплику), отображающую рельеф микрошлифа, для предупреждения вторичного излучения, искажающего картину. При прямом методе изучают тонкие металлические фольги, толщиной до 300 нм, на просвет. Фольги получают непосредственно из изучаемого металла. Растровые микроскопы. Изображение создается за счет вторичной эмиссии электронов, излучаемых поверхностью, на которую падает непрерывно перемещающийся по этой поверхности поток первичных электронов. Изучается непосредственно поверхность металла. Разрешающая способность несколько ниже, чем у просвечивающих микроскопов.

3. Для изучения атомно-кристаллического строения твердых тел (тонкое строение) используются рентгенографические методы, позволяющие устанавливать связь между химическим составом, структурой и свойствами тела, тип твердых растворов, микронапряжения, концентрацию дефектов, плотность дислокаций.

В. Физические методы исследования.

1. Термический анализ основан на явлении теплового эффекта. Фазовые превращения в сплавах сопровождаются тепловым эффектом, в результате на кривых охлаждения сплавов при температурах фазовых превращений наблюдаются точки перегиба или температурные остановки. Данный метод позволяет определить критические точки.

2. Дилатометрический метод. При нагреве металлов и сплавов происходит изменение объема и линейных размеров – тепловое расширение. Если изменения обусловлены только увеличением энергии колебаний атомов, то при охлаждении размеры восстанавливаются. При фазовых превращениях изменения размеров – необратимы. Метод позволяет определить критические точки сплавов, температурные интервалы существования фаз, а также изучать процессы распада твердых растворов.

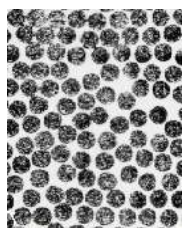
3. Магнитный анализ. Используется для исследования процессов, связанных с переходом из парамагнитного состояния в ферромагнитное (или наоборот), причем возможна количественная оценка этих процессов.

Л.2. Кристаллизация металлов. Фазы и структура в металлических сплавах. Формирование структуры сплавов при кристаллизации

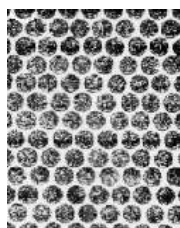
Кристаллизация - это процесс образования кристаллической решетки при переходе из жидкого в твердое состояние. Для того чтобы понять этот процесс, необходимо знать различие между твердым и жидким состоянием. Твердое тело имеет определенную форму и объем, обладает прочностью и пластичностью. Жидкости тоже имеют определенный объем, но, обладая малой сдвиговой прочностью, могут приобретать форму сосуда и могут течь. Таким образом, главное различие твердого и жидкого состояний заключается в изменении текуче-

сти. Текучесть определяется скоростью деформации тела под воздействием приложенной к нему статической силы сдвига.

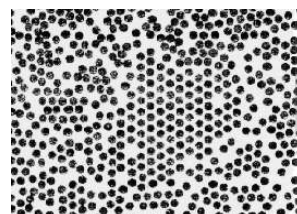
Кроме того, разница в свойствах твердого тела и жидкости проявляется в коэффициенте диффузии – скорости, с которой атомы могут перемещаться в веществе с места на место при их хаотическом движении. Диффузия в жидкостях намного больше, чем в твердых телах. Размещение атомов в жидкостях является неупорядоченным и характеризуется отсутствием дальнего порядка (рис. 2.1.а), то есть упорядоченное расположение атомов распространяется на очень небольшое расстояние.



а)



б)



в)

Рис. 2.1. Ближний порядок (а) жидкости и дальний (б) твердого тела. Нарушение дальнего порядка в твердых телах вследствие теплового движения (в)

Твердое тело можно представить себе как совокупность атомов, расположенных на определенном (межатомном) расстоянии (рис. 2.1.б). Вследствие интенсивного теплового движения атомов ближний порядок динамически неустойчив. Микрообъемы с правильным расположением атомов, возникнув, могут существовать некоторое время, затем распасться и возникнуть вновь в другом месте (рис. 2.1.в). С понижением температуры степень ближнего порядка и размер таких микрообъемов возрастают.

Система, состоящая из большого числа атомов, стремится к такому состоянию, которому в данных условиях соответствует минимальное значение величины свободной энергии. Если вещество может существовать в жидком и твердом кристаллических видах, то устойчивой в данных условиях будет та фаза, которая обладает меньшей величиной свободной энергии.

С изменением внешних условий, например, температура, свободная энергия системы изменяется по сложному закону, который различен для твердого и жидкого состояния (рис. 2.2). При температурах выше равновесной температуры плавления T_p меньшей свободной энергией обладает жидкая фаза, а ниже этой температуры - твердая фаза. При температуре T_p обе фазы могут существовать одновременно и процесс кристаллизации еще не начинается. Для его начала необходимо, чтобы процесс был термодинамически выгоден системе и сопровождался уменьшением свободной энергии системы. Из кривых на рис. 3.5 видно, что это возможно при охлаждении жидкости ниже равновесной температуры T_p .

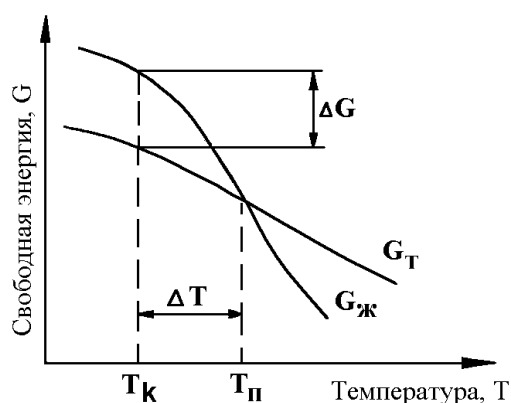


Рис. 2.2. Изменение свободной энергии металла в жидком $G_{ж}$ и твердом состоянии $G_{т}$ в зависимости от температуры

образования кристаллических зародышей и продолжается в процессе роста их числа и размеров. Пока образовавшиеся кристаллы растут свободно, они имеют более или менее правильную геометрическую форму. Однако при столкновении их правильная форма нарушается, так как в этих участках рост граней прекращается. Рост продолжается только в тех направлениях, где есть свободный доступ «питающей» жидкости. В результате образуется структура с кристаллами неправильной формы - зернами или кристаллитами.

При прочих равных условиях скорость процесса кристаллизации и строение металла после затвердевания зависят от числа центров кристаллизации, возникающих в единице времени и в единице объема ($1/(\text{мм}^3 \text{ с})$), и скорости их линейного роста (мм/с). Г. Тамман установил зависимость числа центров кристаллизации и скорости роста кристаллов от степени переохлаждения (рис. 2.4.). При $\Delta T = 0$ процесс кристаллизации не идет, скорости образования зародышей и их роста равны нулю. При $\Delta T = a$ число центров кристаллизации небольшое, а скорость их роста максимальна. В этом случае структура металла будет крупнозернистой. При $\Delta T = b$ число центров - максимально, а скорость их роста мала. Структура металла мелкозернистая.

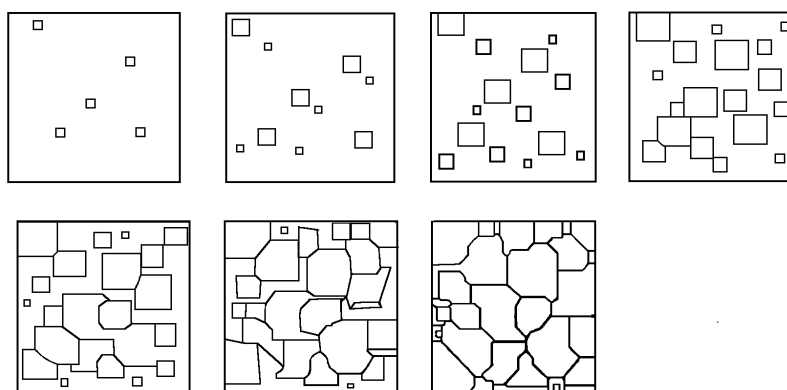


Рис. 2.3. Схема кристаллизации

При очень больших степенях переохлаждения ΔT скорость кристаллизации и число центров равны нулю. Подвижность атомов уже недостаточна для того, чтобы осуществлялась перестройка их из хаотического расположения в жидкости в правильное в кристалле. Структура металла - аморфная.

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

Разность между температурами T_p и T_k называется степенью переохлаждения: $\Delta T = T_p - T_k$. Чем больше степень переохлаждения ΔT , тем больше разность свободных энергий ΔG и больше скорость кристаллизации.

Процесс кристаллизации состоит из двух элементарных процессов. Первый процесс заключается в зарождении мельчайших частиц кристаллов (зародышей или центров кристаллов). В них атомы упакованы также как в твердом металле. Схема кристаллизации приведена на рис. 2.3. Она начинается с обра-

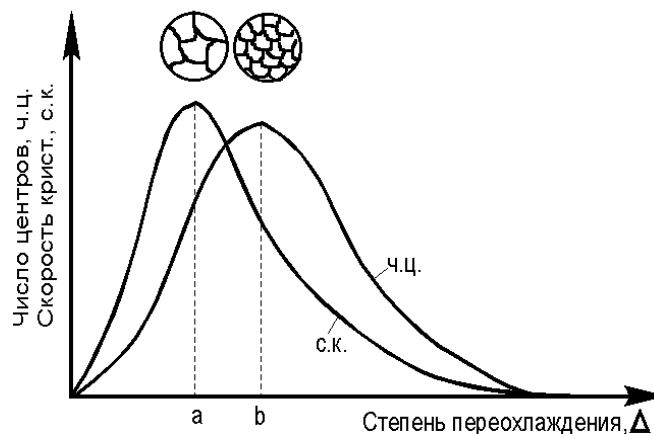


Рис. 2.4. Скорость роста кристалла и скорость зарождения центров кристаллизации в зависимости от степени переохлаждения

Самопроизвольное образование зародышей может происходить только в высокочистом жидком металле при больших степенях переохлаждения. В расплаве всегда присутствуют примеси - неметаллические включения, оксиды и т.д., которые чаще всего и являются зародышами. Если частицы примеси имеют одинаковую кристаллическую решетку с решеткой затвердевающего металла и параметры сопрягающихся решеток примеси и кристаллизующегося вещества примерно одинаковы (отличие не превышает 9%), то они играют роль готовых центров кристаллизации. Структурное сходство между поверхностями зародыша и частицы посторонней примеси приводит к уменьшению размера критического зародыша, работы его образования, и затвердевание жидкости начинается при меньшем переохлаждении, чем при самопроизвольном зарождении. Чем больше примесей, тем больше центров кристаллизации, тем меньше получается зерно. Такое образование зародышей называют гетерогенным.

На практике стараются получить металл с мелким зерном, который имеет, как правило, лучшие эксплуатационные свойства. Получить мелкое зерно можно, увеличивая число центров кристаллизации или уменьшая скорость их роста.

Теория сплавов. Под сплавом понимают вещество, полученное сплавлением двух или более элементов. Возможны другие способы приготовления сплавов: спекания, электролиз, возгонка. В этом случае вещества называются псевдосплавами. Сплав, приготовленный преимущественно из металлических элементов и обладающий металлическими свойствами, называется металлическим сплавом. Сплавы обладают более разнообразным комплексом свойств, которые изменяются в зависимости от состава и метода обработки. К основным понятиям в теории сплавов относят: систему, компоненты, фазу, вариантность.

Система – группа тел выделяемых для наблюдения и изучения. Чистый металл является простой однокомпонентной системой, сплав – сложной системой, состоящей из двух и более компонентов.

Компоненты – вещества, образующие систему. В качестве компонентов выступают чистые вещества и химические соединения, если они не диссоциируют на составные части в исследуемом интервале температур.

Фаза – однородная часть системы, отделенная от других частей системы поверхностного раздела, при переходе через которую структура и свойства резко меняются.

Вариантность (С) (число степеней свободы) – это число внутренних и внешних факторов (температура, давление, концентрация), которые можно изменять без изменения количества фаз в системе.

Строение металлического сплава зависит от того, в какие взаимодействия вступают компоненты, составляющие сплав. Почти все металлы в жидком состоянии растворяются друг в друге в любых соотношениях. При образовании сплавов в процессе их затвердевании возможно различное взаимодействие компонентов.

В зависимости от характера взаимодействия компонентов различают сплавы:

- механические смеси;
- химические соединения;
- твердые растворы.

Сплавы – механические смеси образуются, когда компоненты не способны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединения. Механические смеси образуются между элементами, значительно различающимися по строению и свойствам, когда сила взаимодействия между однородными атомами больше, чем между разнородными. Сплав состоит из кристаллов входящих в него компонентов (рис. 2.5). В сплавах сохраняются кристаллические решетки компонентов.

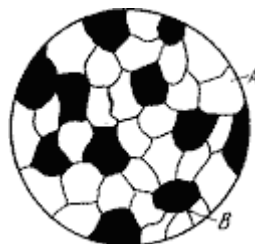


Рис. 2.5. Схема микроструктуры механической смеси

Сплавы – химические соединения образуются между элементами, значительно различающимися по строению и свойствам, если сила взаимодействия между разнородными атомами больше, чем между однородными.

Особенности этих сплавов:

- постоянство состава, то есть сплав образуется при определенном соотношении компонентов, химическое соединение обозначается $A_n B_m$. Образуется специфическая, отличающаяся от решеток элементов, составляющих химическое соединение, кристаллическая решетка с правильным упорядоченным расположением атомов (рис. 2.6);
- ярко выраженные индивидуальные свойства;
- постоянство температуры кристаллизации, как у чистых компонентов.

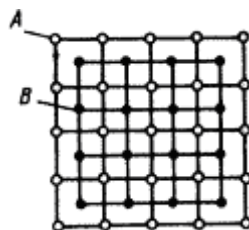


Рис. 2.6. Кристаллическая решетка химического соединения

Сплавы твердые растворы – это твердые фазы, в которых соотношения между компонентами могут изменяться. Являются кристаллическими веществами. Характерной особенностью твердых растворов является наличие в их кристаллической решетке разнородных атомов, при сохранении типа решетки растворителя.

Твердый раствор состоит из однородных зерен (рис. 2.7).

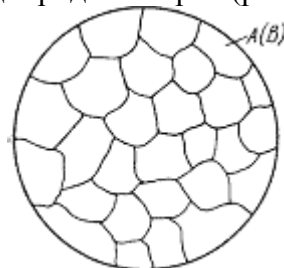


Рис. 2.7. Схема микроструктуры твердого раствора

По степеням растворимости компонентов различают твердые растворы:

- с неограниченной растворимостью компонентов;
- с ограниченной растворимостью компонентов.

При неограниченной растворимости компонентов кристаллическая решетка компонента растворителя по мере увеличения концентрации растворенного компонента плавно переходит в кристаллическую решетку растворенного компонента. Для образования растворов с неограниченной растворимостью необходимы:

- изоморфность (однотипность) кристаллических решеток компонентов;
- близость атомных радиусов компонентов, которые не должны отличаться более чем на 8...13 %.
- близость физико-химических свойств подобных по строению валентных оболочек атомов.

При ограниченной растворимости компонентов возможна концентрация растворенного вещества до определенного предела, При дальнейшем увеличении концентрации однородный твердый раствор распадается с образованием двухфазной смеси.

По характеру распределения атомов растворенного вещества в кристаллической решетке растворителя различают твердые растворы:

- замещения;
- внедрения;
- вычитания.

В растворах замещения в кристаллической решетке растворителя часть его атомов замещена атомами растворенного элемента (рис. 2.8 а). Замещение осуществляется в случайных местах, поэтому такие растворы называют неупорядоченными твердыми растворами.

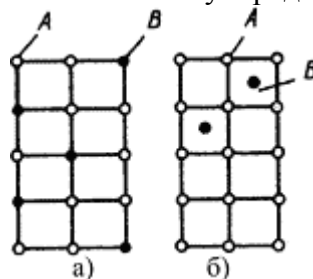


Рис. 2.8. Кристаллическая решетка твердых растворов замещения (а), внедрения (б)

При образовании растворов замещения периоды решетки изменяются в зависимости от разности атомных диаметров растворенного элемента и растворителя. Если атом растворенного элемента больше атома растворителя, то элементарные ячейки увеличиваются, если меньше – сокращаются. В первом приближении это изменение пропорционально концентрации растворенного компонента. Изменение параметров решетки при образовании твердых растворов – важный момент, определяющий изменение свойств. Уменьшение параметра ведет к большему упрочнению, чем его увеличение.

Твердые растворы внедрения образуются внедрением атомов растворенного компонента в поры кристаллической решетки растворителя (рис. 2.8.б). Образование таких растворов, возможно, если атомы растворенного элемента имеют малые размеры. Такими являются элементы, находящиеся в начале периодической системы Менделеева: углерод, водород, азот, бор. Размеры атомов превышают размеры межатомных промежутков в кристаллической решетке металла, это вызывает искажение решетки и в ней возникают напряжения. Концентрация таких растворов не превышает 2...2,5%.

Твердые растворы вычитания или растворы с дефектной решеткой. Образуются на базе химических соединений, при этом возможна не только замена одних атомов в узлах кристаллической решетки другими, но и образование пустых, не занятых атомами, узлов в решетке. К химическому соединению добавляют, один из входящих в формулу элементов, его атомы занимают нормальное положение в решетке соединения, а места атомов другого элемента остаются, незанятыми.

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение состояния любого сплава изучаемой системы в зависимости от концентрации и температуры (рис. 2.9)

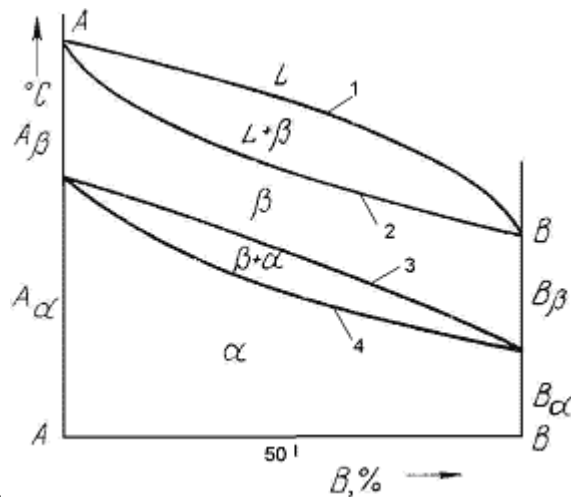


Рис. 2.9. Диаграмма состояния

Диаграммы состояния показывают устойчивые состояния, т.е. состояния, которые при данных условиях обладают минимумом свободной энергии, и поэтому ее также называют диаграммой равновесия, так как она показывает, какие при данных условиях существуют равновесные фазы. Построение диаграмм состояния наиболее часто осуществляется при помощи термического анализа. В результате получают серию кривых охлаждения, на которых при температурах фазовых превращений наблюдаются точки перегиба и температурные остановки. Температуры, соответствующие фазовым превращениям, называют критическими точками. Некоторые критические точки имеют названия, например, точки отвечающие началу кристаллизации называют точками ликвидус, а концу кристаллизации – точками солидус.

По кривым охлаждения строят диаграмму состава в координатах: по оси абсцисс – концентрация компонентов, по оси ординат – температура. Шкала концентраций показывает содержание компонента В. Основными линиями являются линии ликвидус (1) и солидус (2), а также линии соответствующие фазовым превращениям в твердом состоянии (3, 4).

По диаграмме состояния можно определить температуры фазовых превращений, изменение фазового состава, приблизительно, свойства сплава, виды обработки, которые можно применять для сплава.

Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (сплавы твердые растворы с неограниченной растворимостью)

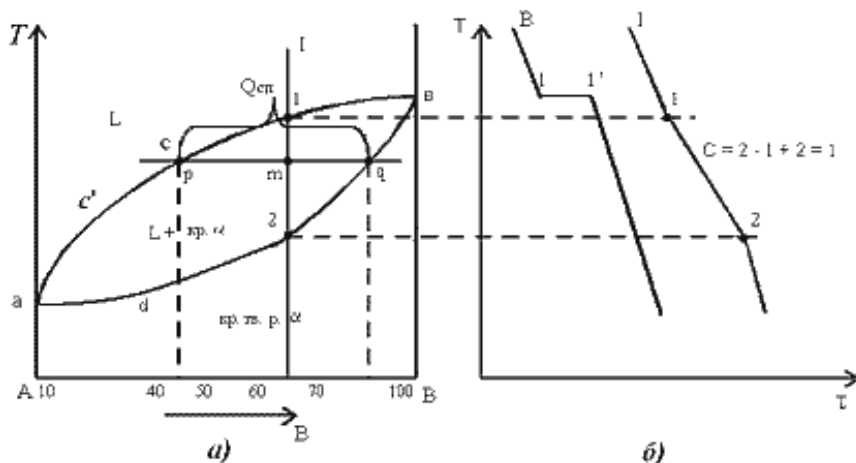


Рис. 2.10. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (а); кривые охлаждения типичных сплавов (б)

Анализ полученной диаграммы.

1. Количество компонентов: $K = 2$ (компоненты А и В).
2. Число фаз: $f = 2$ (жидкая фаза L, кристаллы твердого раствора α)
3. Основные линии диаграммы: acb – линия ликвидус, выше этой линии сплавы находятся в жидком состоянии; adb – линия солидус, ниже этой линии сплавы находятся в твердом состоянии.
4. Количественный структурно-фазовый анализ сплава.

Пользуясь диаграммой состояния можно для любого сплава при любой температуре определить не только число фаз, но и их состав, и количественное соотношение. Для этого используется правило отрезков. Для проведения количественного структурно-фазового анализа через заданную точку проводят горизонталь (коноду) до пересечения с ближайшими линиями диаграммы (ликвидус, солидус или оси компонентов).

а). Определение состава фаз в точке m:

Для его определения через точку m проводят горизонталь до пересечения с ближайшими линиями диаграммы: ликвидус и солидус. Состав жидкой фазы определяется проекцией точки пересечения горизонтали с линией ликвидус p на ось концентрации. Состав твердой фазы определяется проекцией точки пересечения горизонтали с линией солидус q (или осью компонента) на ось концентрации. Состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидуса, а состав твердой фазы – по линии солидуса. С понижением температуры состав фаз изменяется в сторону уменьшения содержания компонента В.

б). Определение количественного соотношения жидкой и твердой фазы при заданной температуре (в точке m):

Количественная масса фаз обратно пропорциональна отрезкам проведенной коноды. Рассмотрим проведенную через точку m коноду и ее отрезки. Количество всего сплава ($Q_{\text{сп}}$) определяется отрезком pq. Отрезок, прилегающий к линии ликвидус pm, определяет количество твердой фазы:

$$Q_{\text{тв}} = \frac{pm}{pq} \cdot 100\%$$

Отрезок, прилегающий к линии солидус (или к оси компонента) mq, определяет количество жидкой фазы:

$$Q_{\text{ж}} = \frac{mq}{pq} \cdot 100\%$$

Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (механические смеси)

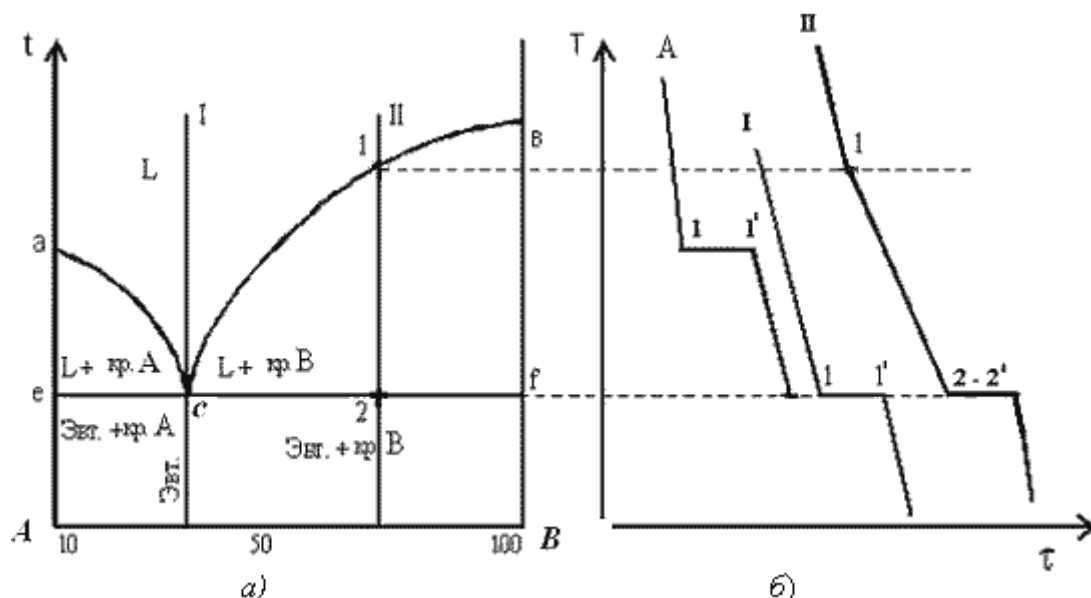


Рис. 2.11. Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (а) и кривые охлаждения сплавов (б)

Проведем анализ диаграммы состояния.

1. Количество компонентов: $K = 2$ (компоненты А и В);
2. Число фаз: $f = 3$ (кристаллы компонента А, кристаллы компонента В, жидкая фаза).
3. Основные линии диаграммы:

- линия ликвидус $асб$, состоит из двух ветвей, сходящихся в одной точке;
- линия солидус $есф$, параллельна оси концентраций стремится к осям компонентов, но не достигает их.

Эвтектика – мелкодисперсная механическая смесь разнородных кристаллов, кристаллизующихся одновременно при постоянной, самой низкой для рассматриваемой системы, температуре.

Схема микроструктуры сплава представлена на рис. 2.12.

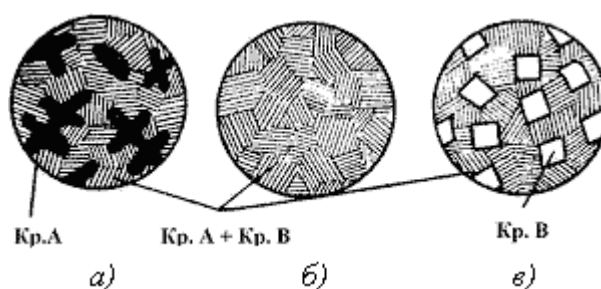


Рис. 2.12. Схема микроструктур сплавов:
а – доэвтектического, б – эвтектического, в – заэвтектического

Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

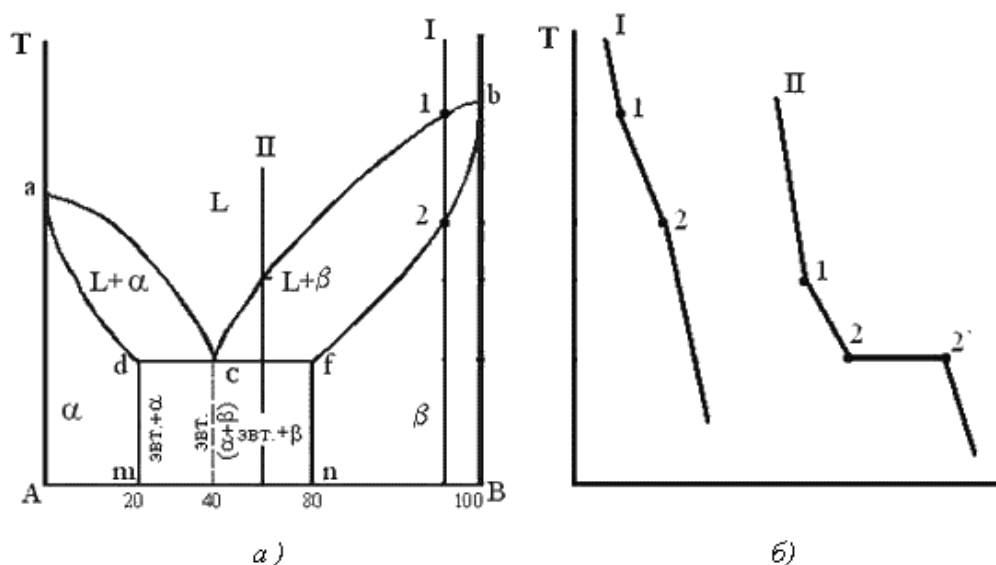


Рис. 2.13. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (а) и кривые охлаждения типичных сплавов (б)

1. Количество компонентов: $K = 2$ (компоненты А и В);
2. Число фаз: $f = 3$ (жидкая фаза и кристаллы твердых растворов α (раствор компонента В в компоненте А) и β (раствор компонента А в компоненте В);
3. Основные линии диаграммы:
 - линия ликвидус acb , состоит из двух ветвей, сходящихся в одной точке;
 - линия солидус $adcfb$, состоит из трех участков;
 - dm – линия предельной концентрации компонента В в компоненте А;
 - fn – линия предельной концентрации компонента А в компоненте В.

Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют химические соединения

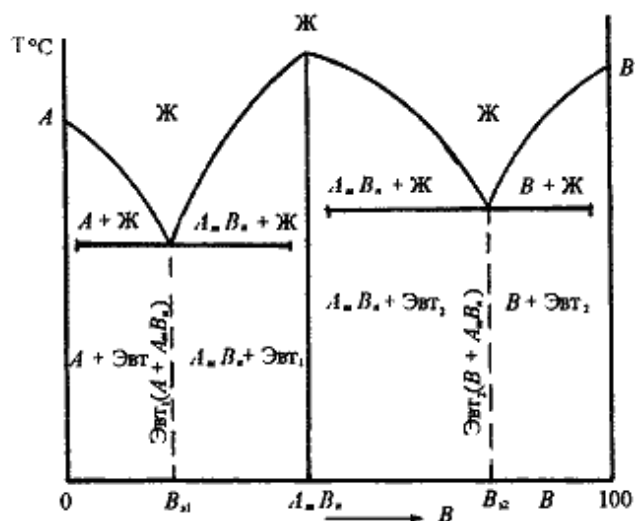


Рис. 2.14. Диаграмма состояния сплавов, компоненты, которых образуют химические соединения

Диаграмма состояния сложная, состоит из нескольких простых диаграмм. Число компонентов и количество диаграмм зависит от того, сколько химических соединений образуют основные компоненты системы. Число фаз и вид простых диаграмм определяются характе-

ром взаимодействия между компонентами:

Эвт1 (кр. А + кр. AmBn);

Эвт2 (кр. В + кр. AmBn).

Диаграмма состояния сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии (переменная растворимость)

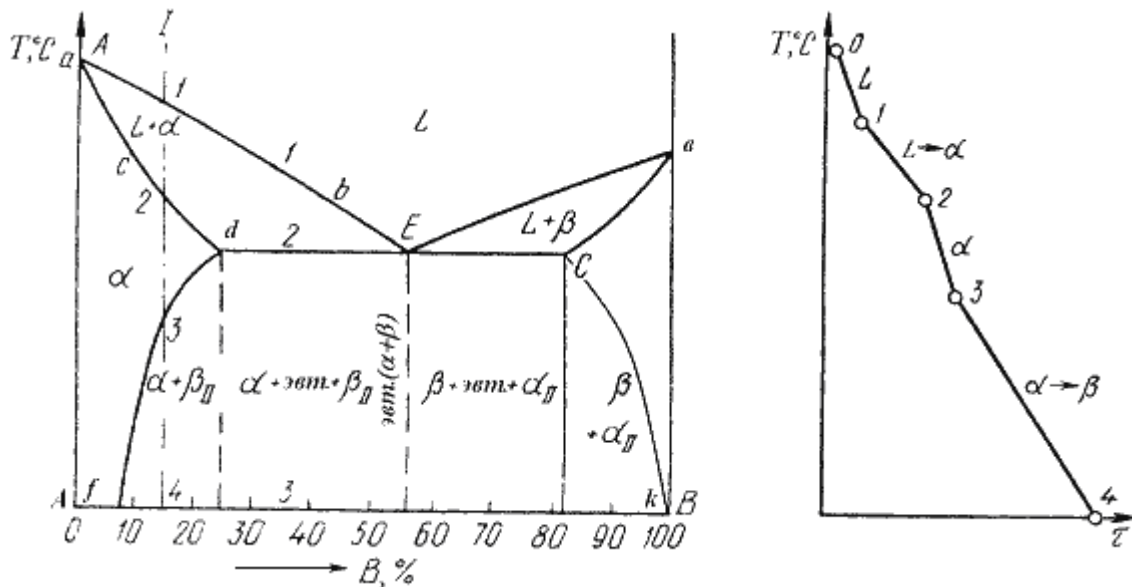


Рис. 2.15. Диаграмма состояния сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии (а) и кривая охлаждения сплава (б)

По внешнему виду диаграмма похожа на диаграмму состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Отличие в том, что линии предельной растворимости компонентов не перпендикулярны оси концентрации. Появляются области, в которых из однородных твердых растворов при понижении температуры выделяются вторичные фазы.

На диаграмме:

- df – линия переменной предельной растворимости компонента В в компоненте А;
- ек – линия переменной предельной растворимости компонента А в компоненте В.

Связь между свойствами сплавов и типом диаграммы состояния

Так как вид диаграммы, также как и свойства сплава, зависит от того, какие соединения или какие фазы образовали компоненты сплава, то между ними должна существовать определенная связь. Эта зависимость установлена Курнаковым, (см. рис. 2.16).

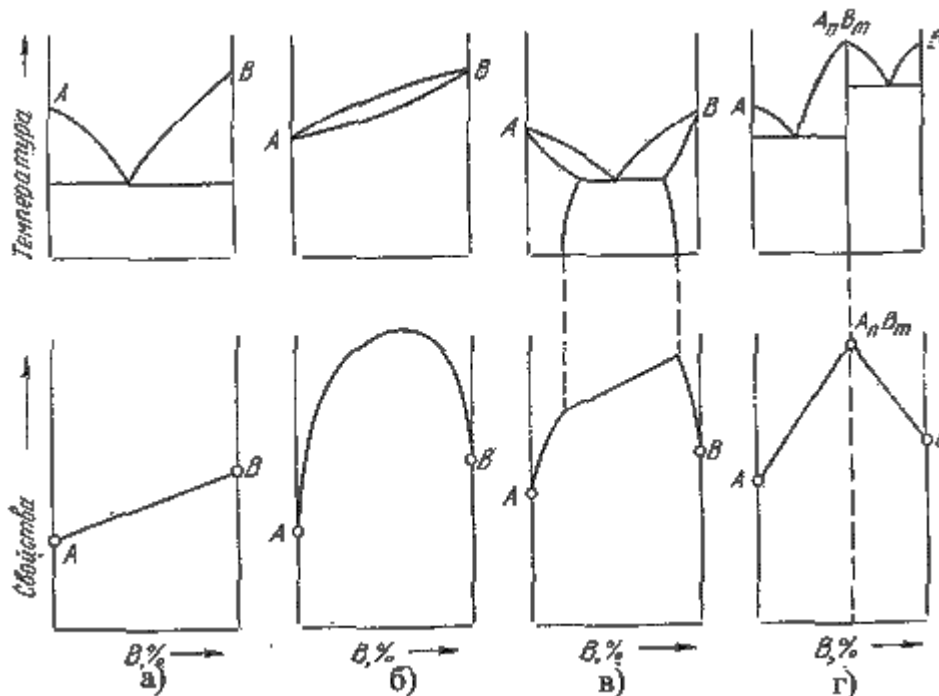


Рис. 2.16. Связь между свойствами сплавов и типом диаграммы состояния

При образовании механических смесей свойства изменяются по линейному закону. Значения характеристик свойств сплава находятся в интервале между характеристиками чистых компонентов.

При образовании твердых растворов с неограниченной растворимостью свойства сплавов изменяются по криволинейной зависимости, причем некоторые свойства, например, электросопротивление, могут значительно отличаться от свойств компонентов.

При образовании твердых растворов с ограниченной растворимостью свойства в интервале концентраций, отвечающих однофазным твердым растворам, изменяются по криволинейному закону, а в двухфазной области – по линейному закону. Причем крайние точки на прямой являются свойствами чистых фаз, предельно насыщенных твердых растворов, образующих данную смесь.

При образовании химических соединений концентрация химического соединения отвечает максимуму на кривой. Эта точка перелома, соответствующая химическому соединению, называется сингулярной точкой.

Л.3. Деформация и разрушение металла. **Влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла. Свойства металлов**

Физическая природа деформации металлов.

Деформацией называется изменение формы и размеров тела под действием напряжений.

Напряжение – сила, действующая на единицу площади сечения детали. Напряжения и вызываемые ими деформации могут возникать при действии на тело внешних сил растяжения, сжатия и т.д., а также в результате фазовых (структурных) превращений, усадки и других физико-химических процессов, протекающих в металлах, и связанных с изменением объема.

Металл, находящийся в напряженном состоянии, при любом виде нагружения всегда испытывает напряжения нормальные и касательные (рис. 3.1.).

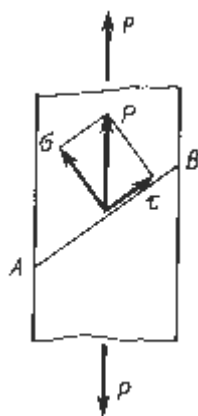


Рис. 3.1. Схема возникновения нормальных и касательных напряжений в металле при его нагружении

Рост нормальных и касательных напряжений приводит к разным последствиям. Рост нормальных напряжений приводит к хрупкому разрушению. Пластическую деформацию вызывают касательные напряжения.

Деформация металла под действием напряжений может быть упругой и пластической. Упругой называется деформация, полностью исчезающая после снятия вызывающих ее напряжений. При упругом деформировании изменяются расстояния между атомами металла в кристаллической решетке. Снятие нагрузки устраняет причину, вызвавшую изменение межатомного расстояния, атомы становятся на прежние места, и деформация исчезает. Если нормальные напряжения достигают значения сил межатомных связей, то наблюдается хрупкое разрушение путем отрыва (рис.3.2)

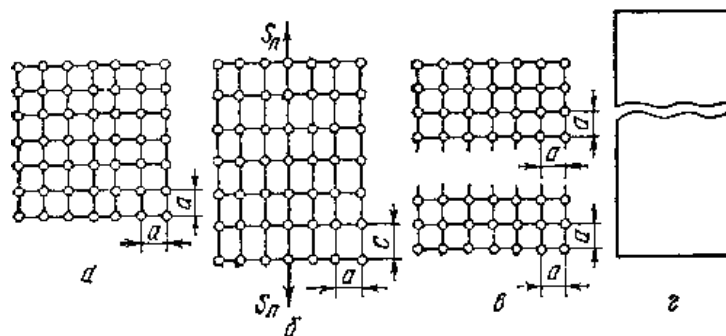


Рис. 3.2. Схема упругой деформации и хрупкого разрушения под действием упругих напряжений а – ненапряженная решетка металла;
б – упругая деформация; в, г – хрупкое разрушение в результате отрыва
Пластической или остаточной называется деформация, которая остается после прекра-

щения действия вызвавших ее напряжений. При пластическом деформировании одна часть кристалла перемещается по отношению к другой под действием касательных напряжений. При снятии нагрузок сдвиг остается, т.е. происходит пластическая деформация (рис. 3.3). В результате развития пластической деформации может произойти вязкое разрушение путем сдвига. Схемы пластической деформации представлены на рис. 3.4.

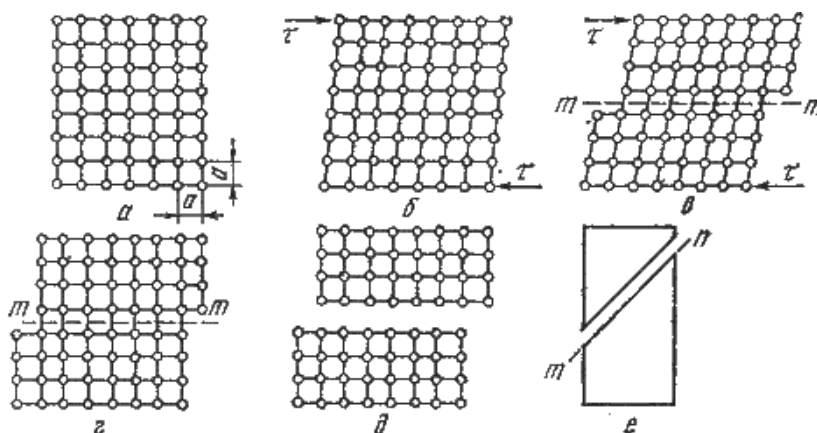


Рис. 3.3. Схема пластической деформации и вязкого разрушения под действием касательных напряжений а – ненапряженная решетка; б – упругая деформация; в – упругая и пластическая деформация; г – пластическая деформация; д, е – пластичное (вязкое) разрушение в результате среза

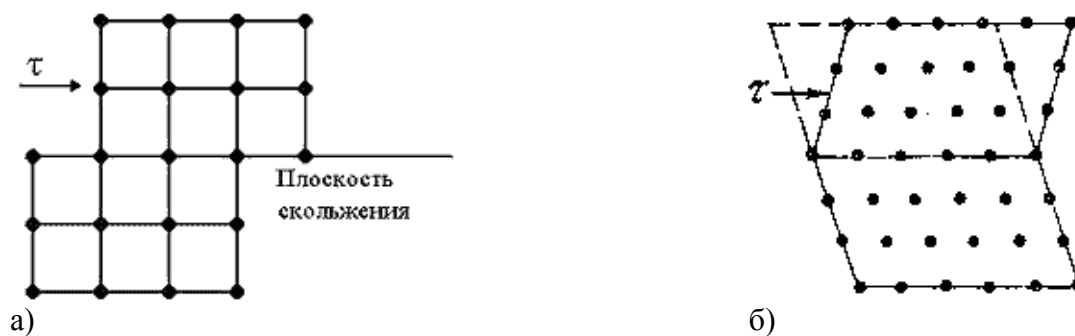


Рис. 3.4. Схемы пластической деформации различными способами: а – скольжением; б – двойникованием

Разрушение металлов.

Процесс деформации при достижении высоких напряжений завершается разрушением. Тела разрушаются по сечению не одновременно, а вследствие развития трещин. Разрушение включает три стадии: зарождение трещины, ее распространение через сечение, окончательное разрушение.

Различают хрупкое разрушение – отрыв одних слоев атомов от других под действием нормальных растягивающих напряжений. Отрыв не сопровождается предварительной деформацией. Механизм зарождения трещины одинаков – благодаря скоплению движущихся дислокаций перед препятствием (границы субзерен, фазовые границы), что приводит к концентрации напряжений, достаточной для образования трещины. Когда напряжения достигают определенного значения, размер трещины становится критическим и дальнейший рост осуществляется произвольно. Для хрупкого разрушения характерна острая, часто ветвящаяся трещина. Величина зоны пластической деформации в устье трещины мала. Скорость распространения хрупкой трещины велика – близка к скорости звука (внезапное, катастрофическое разрушение). Энергоемкость хрупкого разрушения мала, а работа распространения трещины близка к нулю. Результатом хрупкого разрушения является блестящий светлый кристаллический излом с ручьистым строением. Хрупкая трещина распространяется по нескольким параллельным плоскостям. Плоскость излома перпендикулярна нормальным напряжениям.

Вязкое разрушение – путем среза под действием касательных напряжений. Ему всегда предшествует значительная пластическая деформация. Трещина тупая раскрывающаяся. Величина пластической зоны впереди трещины велика. Малая скорость распространения трещины. Энергоемкость значительная, энергия расходуется на образование поверхностей раздела и на пластическую деформацию. Большая работа затрачивается на распространение трещины. Поверхность излома негладкая, рассеивает световые лучи, матовая (волоконистый) излом. Плоскость излома располагается под углом. По излому можно определить характер разрушения.

Особенности деформации поликристаллических тел.

Рассмотрим холодную пластическую деформацию поликристалла. Пластическая деформация металлов и сплавов как тел поликристаллических, имеет некоторые особенности по сравнению с пластической деформацией монокристалла.

Деформация поликристаллического тела складывается из деформации отдельных зерен и деформации в приграничных объемах. Отдельные зерна деформируются скольжением и двойникованием, однако взаимная связь зерен и их множественность в поликристалле вносят свои особенности в механизм деформации. Плоскости скольжения зерен произвольно ориентированы в пространстве, поэтому под влиянием внешних сил напряжения в плоскостях скольжения отдельных зерен будут различны. Деформация начинается в отдельных зернах, в плоскостях скольжения которых возникают максимальные касательные напряжения. Соседние зерна будут разворачиваться и постепенно вовлекаться в процесс деформации. Деформация приводит к изменению формы зерен: зерна получают форму, вытянутую в направлении наиболее интенсивного течения металла (поворачиваются осями наибольшей прочности вдоль направления деформации). Изменение структуры при деформации показано на рис. 3.5.

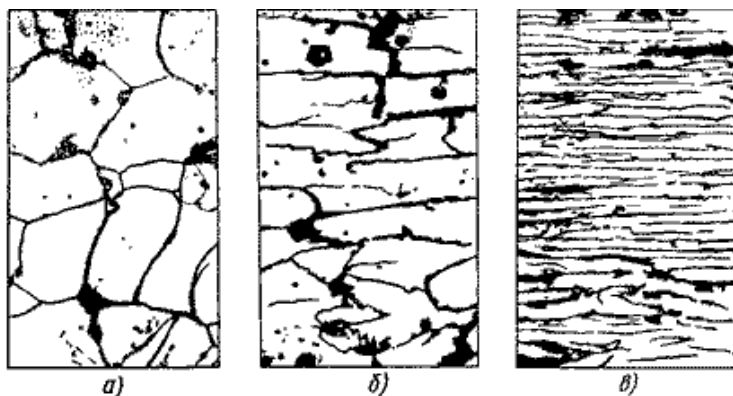


Рис. 3.5. Изменение структуры при деформации:
а) до деформации; б) после обжатия на 35%; в) после обжатия на 90%.

Металл приобретает волокнистое строение. Волокна с вытянутыми вдоль них неметаллическими включениями являются причиной неодинаковости свойств вдоль и поперек волокон. Одновременно с изменением формы зерен в процессе пластической деформации происходит изменение ориентировки в пространстве их кристаллической решетки. Когда кристаллические решетки большинства зерен получают одинаковую ориентировку, возникает текстура деформации.

Влияние пластической деформации на структуру и свойства металла: наклеп

Текстура деформации создает кристаллическую анизотропию, при которой наибольшая разница свойств проявляется для направлений, расположенных под углом 45° друг к другу. С увеличением степени деформации характеристики пластичности (относительное удлинение, относительное сужение) и вязкости (ударная вязкость) уменьшаются, а прочностные харак-

теристики (предел упругости, предел текучести, предел прочности) и твердость увеличиваются (рис. 3.6). Также повышается электросопротивление, снижаются сопротивление коррозии, теплопроводность, магнитная проницаемость.

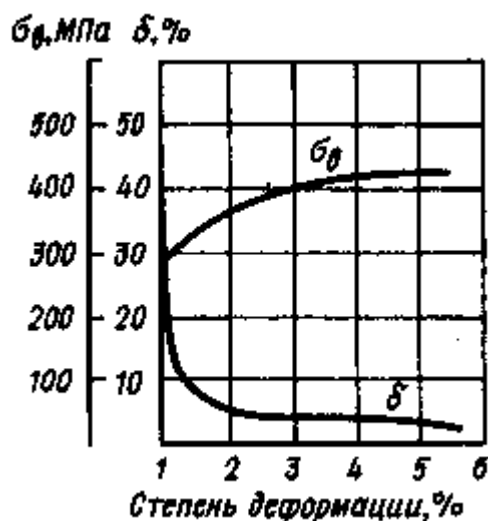


Рис.3.6. Влияние холодной пластической деформации на механические свойства металла

Совокупность явлений, связанных с изменением механических, физических и других свойств металлов в процессе пластической деформации называют деформационным упрочнением или наклепом. Упрочнение при наклепе объясняется возрастанием на несколько порядков плотности дислокаций: $\rho = 10^6 \dots 10^8 \rightarrow 10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Их свободное перемещение затрудняется взаимным влиянием, также торможением дислокаций в связи с измельчением блоков и зерен, искажениями решетки металлов, возникновением напряжений.

Влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла.

Деформированный металл находится в неравновесном состоянии. Переход к равновесному состоянию связан с уменьшением искажений в кристаллической решетке, снятием напряжений, что определяется возможностью перемещения атомов. При низких температурах подвижность атомов мала, поэтому состояние наклепа может сохраняться неограниченно долго. При повышении температуры металла в процессе нагрева после пластической деформации диффузия атомов увеличивается и начинают действовать процессы разупрочнения, приводящие металл в более равновесное состояние — возврат и рекристаллизация.

Возврат. Небольшой нагрев вызывает ускорение движения атомов, снижение плотности дислокаций, устранение внутренних напряжений и восстановление кристаллической решетки. Процесс частичного разупрочнения и восстановления свойств называется отдыхом (первая стадия возврата). Имеет место при температуре $(0,2 \dots 0,3)T_{пл}$. Возврат уменьшает искажение кристаллической решетки, но не влияет на размеры и форму зерен и не препятствует образованию текстуры деформации.

Полигонизация — процесс деления зерен на части: фрагменты, полигоны в результате скольжения и переползания дислокаций. В полигонизированном состоянии кристалл обладает меньшей энергией, поэтому образование полигонов — процесс энергетически выгодный. Процесс протекает при небольших степенях пластической деформации. В результате понижается прочность на $(10 \dots 15) \%$ и повышается пластичность. Границы полигонов мигрируют в сторону большей объемной плотности дислокаций, присоединяя новые дислокации, благодаря чему углы разориентировки зерен увеличиваются (зерна аналогичны зернам, образующимся при рекристаллизации). Изменений в микроструктуре не наблюдается (рис.3.7 а). Температура начала полигонизации не является постоянной. Скорость процесса зависит от природы металла, содержания примесей, степени предшествующей деформации.

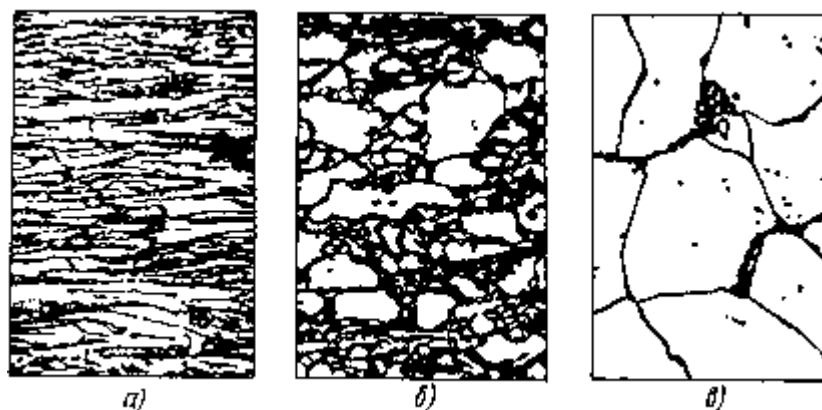


Рис. 3.7. Изменение структуры деформированного металла при нагреве

При нагреве до достаточно высоких температур подвижность атомов возрастает и происходит рекристаллизация. Рекристаллизация – процесс зарождения и роста новых недеформированных зерен при нагреве наклепанного металла до определенной температуры. Нагрев металла до температур рекристаллизации сопровождается резким изменением микроструктуры и свойств. Нагрев приводит к резкому снижению прочности при одновременном возрастании пластичности. Также снижается электросопротивление и повышается теплопроводность. Различают две стадии рекристаллизации.

1 стадия – первичная рекристаллизация (обработки) заключается в образовании центров кристаллизации и росте новых равновесных зерен с неискаженной кристаллической решеткой. Новые зерна возникают у границ старых зерен и блоков, где решетка была наиболее искажена. Количество новых зерен постепенно увеличивается и в структуре не остается старых деформированных зерен. Движущей силой первичной рекристаллизации является энергия, аккумулированная в наклепанном металле. Система стремится перейти в устойчивое состояние с неискаженной кристаллической решеткой.

2 стадия – собирательная рекристаллизация заключается в росте образовавшихся новых зерен. Движущей силой является поверхностная энергия зерен. При мелких зернах поверхность раздела большая, поэтому имеется большой запас поверхностной энергии. При укрупнении зерен общая протяженность границ уменьшается, и система переходит в более равновесное состояние.

Температура начала рекристаллизации связана с температурой плавления: $T_{рек} = aT_{пл}$, где: для металлов $a = 0,4$; для твердых растворов $a = 0,5...0,8$; для металлов высокой чистоты $a = 0,1...0,2$. На свойства металла большое влияние оказывает размер зерен, получившихся при рекристаллизации. В результате образования крупных зерен при нагреве до температуры t_1 начинает понижаться прочность и, особенно значительно, пластичность металла. Основными факторами, определяющими величину зерен металла при рекристаллизации, являются температура, продолжительность выдержки при нагреве и степень предварительной деформации. С повышением температуры происходит укрупнение зерен, с увеличением времени выдержки зерна также укрупняются. Наиболее крупные зерна образуются после незначительной предварительной деформации 3...10 %. Такую деформацию называют критической. И такая деформация нежелательна перед проведением рекристаллизационного отжига. Практически рекристаллизационный отжиг проводят для малоуглеродистых сталей при температуре 600...700 °С, для латуней и бронз – 560...700 °С, для алюминиевых сплавов – 350...450 °С, для титановых сплавов – 550...750 °С.

Свойства металлов и сплавов.

Свойства металлов подразделяются на физические, химические, технологические, эксплуатационные и механические.

Физические свойства металлов.

Плотность – количество вещества, содержащееся в единице объема.

Плавление – способность металла переходить из кристаллического (твердого) состояния в жидкое с поглощением теплоты.

Теплопроводность – способность металла с той или иной скоростью проводить теплоту при нагревании.

Электропроводность – способность металла проводить электрический ток.

Тепловое расширение – способность металла увеличивать свой объем при нагревании.

Химические свойства металлов. Химические свойства металлов характеризуют отношение их к химическим воздействиям различных активных сред. Каждый металл обладает определенной способностью сопротивляться этим воздействиям. Основными химическими свойствами металлов являются окисляемость и коррозионная стойкость.

Окисляемость – способность металла вступать в реакцию в кислороде под воздействием окислителей.

Коррозионная стойкость – способность металла сопротивляться коррозии.

Технологические свойства металлов. Технологические свойства металлов определяют их способность подвергаться различным видам обработки.

Ковкость – способность металла изменять свою форму в нагретом или холодном состоянии под действием внешних сил.

Свариваемость – способность двух частей металла при нагревании прочно соединяться друг с другом.

Жидкотекучесть – способность расплавленного металла легко растекаться и хорошо заполнять форму.

Усадка (линейная и объемная) – характеризует способность материала изменять свои линейные размеры и объем в процессе затвердевания и охлаждения. Для предупреждения линейной усадки при создании моделей используют нестандартные метры.

Ликвация – неоднородность химического состава по объему.

Прокаливаемость – способность металла закаливаться на ту или иную глубину.

Обрабатываемость резанием – способность металла подвергаться механической обработке режущим инструментом с определенной скоростью и усилием резания.

Эксплуатационные свойства. Эксплуатационные свойства характеризуют способность материала работать в конкретных условиях.

Износостойкость – способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения.

Коррозионная стойкость – способность материала сопротивляться действию агрессивных кислотных, щелочных сред.

Жаростойкость – это способность материала сопротивляться окислению в газовой среде при высокой температуре.

Жаропрочность – это способность материала сохранять свои свойства при высоких температурах.

Хладостойкость – способность материала сохранять пластические свойства при отрицательных температурах.

Антифрикционность – способность материала прирабатываться к другому материалу.

Механические свойства металлов. К механическим свойствам металлов относят твердость, прочность, вязкость, упругость и пластичность. В зависимости от условий нагружения механические свойства могут определяться при:

- статическом нагружении – нагрузка на образец возрастает медленно и плавно.
- динамическом нагружении – нагрузка возрастает с большой скоростью, имеет ударный характер.
- повторно, переменном или циклическом нагружении – нагрузка в процессе испытания многократно изменяется по величине или по величине и направлению.

Для получения сопоставимых результатов образцы и методика проведения механических испытаний регламентированы ГОСТами. При статическом испытании на растяжение: ГОСТ 1497 получают характеристики прочности и пластичности.

Прочность – способность материала сопротивляться деформациям и разрушению. Испытания проводятся на специальных машинах, которые записывают диаграмму растяжения, выражающую зависимость удлинения образца от действующей нагрузки. Но для получения данных по механическим свойствам перестраивают зависимость относительного удлинения от напряжения.

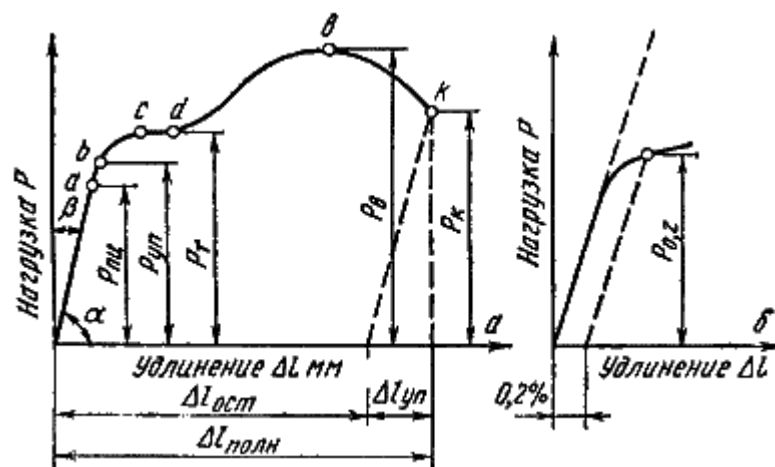


Рис. 3.8. Диаграмма растяжения

Проанализируем процессы, которые происходят в материале образца при увеличении нагрузки. Участок *oa* на диаграмме соответствует упругой деформации материала, когда соблюдается закон Гука. Напряжение, соответствующее упругой предельной деформации в точке *a*, называется пределом пропорциональности. Предел пропорциональности это максимальное напряжение, до которого сохраняется линейная зависимость между деформацией и напряжением. При напряжениях выше предела пропорциональности происходит равномерная пластическая деформация (удлинение или сужение сечения). Каждому напряжению соответствует остаточное удлинение, которое получаем проведением из соответствующей точки диаграммы растяжения линии параллельной *oa*. Так как практически невозможно установить точку перехода в неупругое состояние, то устанавливают условный предел упругости – максимальное напряжение, до которого образец получает только упругую деформацию. Считают напряжение, при котором остаточная деформация очень мала (0,005...0,05%). Предел текучести характеризует сопротивление материала небольшим пластическим деформациям. В зависимости от природы материала используют физический или условный предел текучести. Физический предел текучести это напряжение, при котором происходит увеличение деформации при постоянной нагрузке (наличие горизонтальной площадки на диаграмме растяжения). Используется для очень пластичных материалов. Но основная часть металлов и сплавов не имеет площадки текучести. Поэтому вводится понятие условного предела текучести. Условный предел текучести – это напряжение вызывающее остаточную деформацию 0,2 %.

Физический или условный предел текучести являются важными расчетными характеристиками материала. Действующие в детали напряжения должны быть ниже предела текучести.

Равномерная по всему объему пластическая деформация продолжается до значения предела прочности. В точке *в* – в наиболее слабом месте начинает образовываться шейка – сильное местное утомление образца. Предел прочности – напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, которую выдерживает образец до разрушения (временное сопротивление разрыву).

Образование шейки характерно для пластичных материалов, которые имеют диаграмму растяжения с максимумом. Предел прочности характеризует прочность как сопротивления значительной равномерной пластической деформации. За точкой *в*, вследствие развития шейки, нагрузка падает и в точке *к* происходит разрушение.

Истинное сопротивление разрушению – это максимальное напряжение, которое вы-

держивает материал в момент, предшествующий разрушению образца (рис. 3.9). Истинное сопротивление разрушению значительно больше предела прочности, так как оно определяется относительно конечной площади поперечного сечения образца.

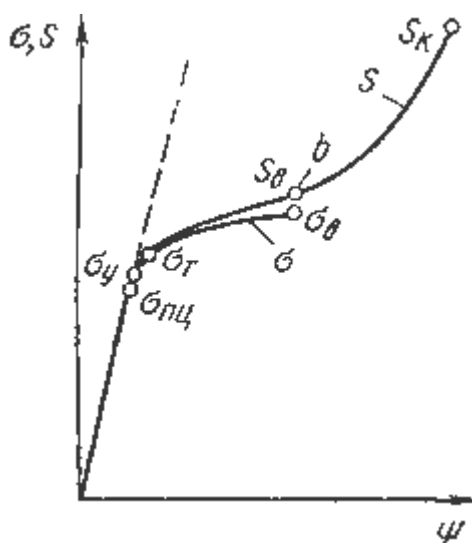


Рис. 3.9. Истинная диаграмма растяжения

При испытании на растяжение определяются и характеристики пластичности.

Пластичность – способность материала к пластической деформации, т.е. способность получать остаточное изменение формы и размеров без нарушения сплошности. Это свойство используют при обработке металлов давлением.

$$\delta = \frac{l_x - l_0}{l_0} 100\% = \frac{\Delta l_{ост}}{l_0} 100\% ;$$

Характеристики: относительное удлинение

$$\Psi = \frac{F_0 - F_x}{F_0} 100\%$$

относительное сужение

Относительное сужение более точно характеризует пластичность и служит технологической характеристикой при листовой штамповке. Пластичные материалы более надежны в работе, т.к. для них меньше вероятность опасного хрупкого разрушения.

Твердость – это сопротивление материала проникновению в его поверхность стандартного тела (индентора), не деформирующегося при испытании. Широкое распространение объясняется тем, что не требуются специальные образцы. Это неразрушающий метод контроля. Основной метод оценки качества термической обработке изделия. О твердости судят либо по глубине проникновения индентора (метод Роквелла), либо по величине отпечатка от вдавливания (методы Бринелля, Виккерса, микротвердости). Во всех случаях происходит пластическая деформация материала. Чем больше сопротивление материала пластической деформации, тем выше твердость.

Наибольшее распространение получили методы Бринелля, Роквелла, Виккерса и микротвердости. Схемы испытаний представлены на рис. 3.10.

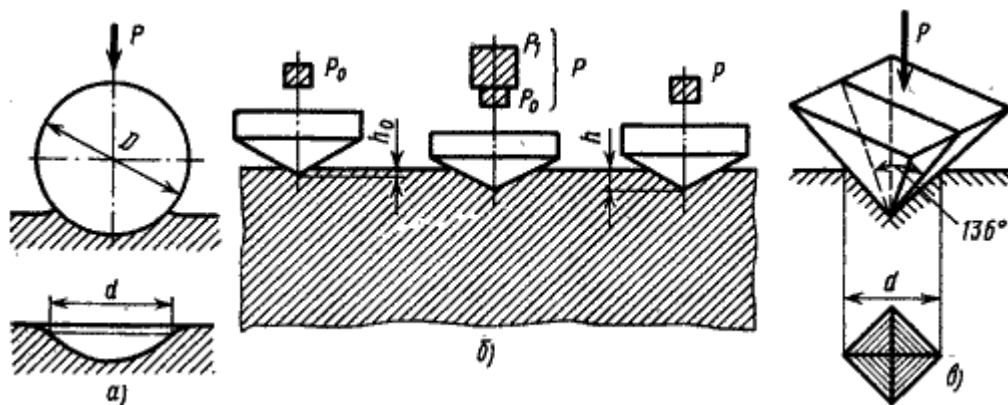


Рис. 3.10. Схемы определения твердости: а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу

Твердость по Бринеллю (ГОСТ 9012)

Испытание проводят на твердомере Бринелля (рис.3.10 а). В качестве индентора используется стальной закаленный шарик диаметром D 2,5; 5; 10 мм, в зависимости от толщины изделия.

Нагрузка P , в зависимости от диаметра шарика и измеряемой твердости: для термически обработанной стали и чугуна – $P = 30D^2$, литой бронзы и латуни – $P = 10D^2$, алюминия и других очень мягких металлов – $P = 2,5D^2$. Продолжительность выдержки τ : для стали и чугуна – 10 с, для латуни и бронзы – 30 с. Полученный отпечаток измеряется в двух направлениях при помощи лупы Бринелля. Твердость определяется как отношение приложенной нагрузки P к сферической поверхности отпечатка F :

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

Стандартными условиями являются $D = 10$ мм; $P = 3000$ кгс; $\tau = 10$ с. В этом случае твердость по Бринеллю обозначается HB 250, в других случаях указываются условия: HB $D / P / \tau$, HB 5/ 250 /30 – 80.

Метод Роквелла ГОСТ 9013

Основан на вдавливании в поверхность наконечника под определенной нагрузкой (рис. 3.10 б)

Индентор для мягких материалов (до HB 230) – стальной шарик диаметром 1/16” ($\varnothing$ 1,6 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 (табл. 3.1)
Таблица 3.1. Шкалы для определения твердости по Роквеллу.

Шкала	Обозначение	Индентор	Нагрузка, кг			Область применения
			P0	P1	P2	
A	HRA	Алмазный конус < 1200	10	50	60	Для особо твердых материалов
B	HRB	Стальной закаленный шарик Ø1/16"	10	90	100	Для относительно мягких материалов
C	HRC	Алмазный конус < 1200	10	140	150	Для относительно твердых материалов

Метод Виккерса.

Твердость определяется по величине отпечатка (рис. 3.10 в). В качестве индентора используется алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине 136° . Твердость рассчитывается как отношение приложенной нагрузки P к площади поверхности отпечатка F :

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

Нагрузка P составляет 5...100 кгс. Диагональ отпечатка d измеряется при помощи микроскопа, установленного на приборе. Преимущество данного способа в том, что можно измерять твердость любых материалов, тонкие изделия, поверхностные слои. Высокая точность и чувствительность метода.

Способ микротвердости.

Применяется для определения твердости отдельных структурных составляющих и фаз сплава, очень тонких поверхностных слоев (сотые доли миллиметра). Аналогичен способу Виккерса. Индентор – пирамида меньших размеров, нагрузки при вдавливании P составляют 5...500 кгс.

$$H_{200} = 1,854 \frac{P}{d^2}$$

Метод царапания.

Алмазным конусом, пирамидой или шариком наносится царапина, которая является мерой. При нанесении царапин на другие материалы и сравнении их с мерой судят о твердости материала. Можно нанести царапину шириной 10 мм под действием определенной нагрузки. Наблюдают за величиной нагрузки, которая дает эту ширину.

Динамический метод (по Шору).

Шарик бросают на поверхность с заданной высоты, он отскакивает на определенную величину. Чем больше величина отскока, тем тверже материал.

Вязкость металлов. В результате проведения динамических испытаний на ударный изгиб специальных образцов с надрезом (ГОСТ 9454) оценивается вязкость материалов и уста-

навливаются их склонность к переходу из вязкого состояния в хрупкое.

Вязкость – способность материала поглощать механическую энергию внешних сил за счет пластической деформации. Является энергетической характеристикой материала, выражается в единицах работы. Вязкость металлов и сплавов определяется их химическим составом, термической обработкой и другими внутренними факторами. Также вязкость зависит от условий, в которых работает металл (температуры, скорости нагружения, наличия концентраторов напряжения).

Ударная вязкость характеризует надежность материала, его способность сопротивляться хрупкому разрушению. Испытание проводят на образцах с надрезами определенной формы и размеров. Образец устанавливают на опорах копра надрезом в сторону, противоположную удару ножа маятника, который поднимают на определенную высоту (рис. 3.11)

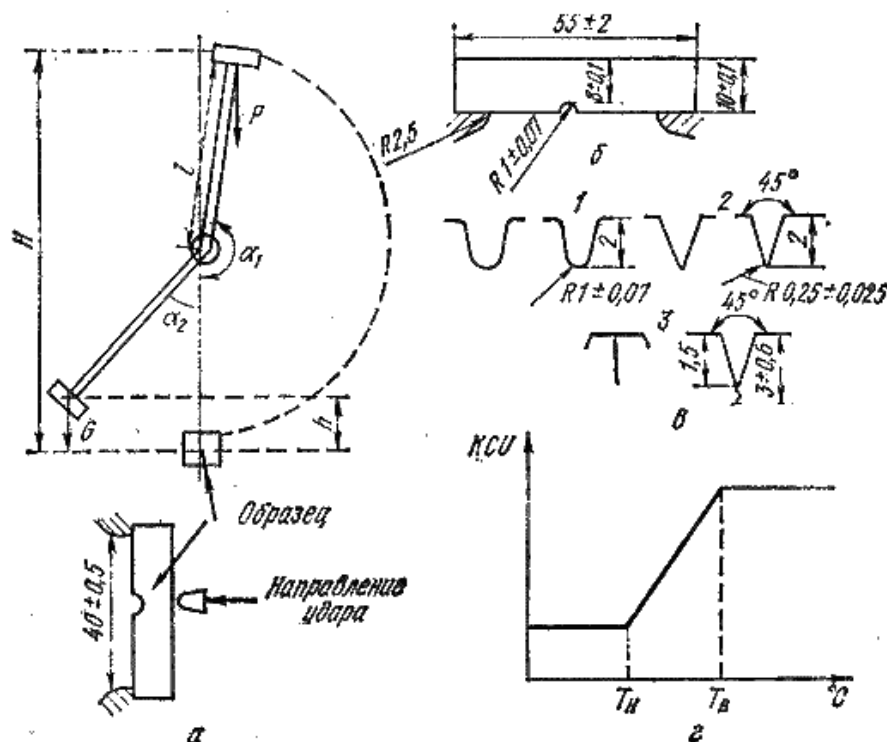


Рис.3.11. Схема испытания на ударную вязкость:

а – схема маятникового копра; б – стандартный образец с надрезом;

в – виды концентраторов напряжений; г – зависимость вязкости от температуры

На разрушение образца затрачивается работа:

$$A = P(H - h)$$

где: P – вес маятника, H – высота подъема маятника до удара, h – высота подъема маятника после удара.

Характеристикой вязкости является ударная вязкость (a_n), – удельная работа разрушения.

$$a_n = \frac{A}{F_0}$$

где: F_0 – площадь поперечного сечения в месте надреза.

ГОСТ 9454 – 78 ударную вязкость обозначает KCV. KCU. KCT. KC – символ ударной вязкости, третий символ показывает вид надреза: острый (V), с радиусом закругления (U), трещина (T) (рис. 3.11 в)

Серийные испытания для оценки склонности металла к хладоломкости и определения критических порогов хладоломкости. Испытывают серию образцов при различных температурах и строят кривые ударная вязкость – температура ($a_n - T$) (рис. 3.11 г), определяя пороги хладоломкости.

Порог хладоломкости – температурный интервал изменения характера разрушения, яв-

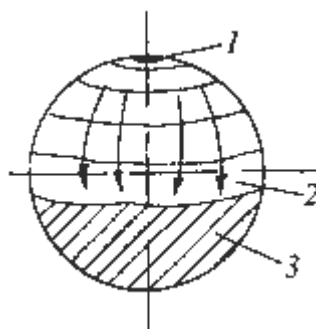
ляется важным параметром конструкционной прочности. Чем ниже порог хладоломкости, тем менее чувствителен металл к концентраторам напряжений (резкие переходы, отверстия, риски), к скорости деформации.

Также вязкость можно определить по характеру излома. При вязком состоянии металла (в изломе более 90 % волокон) – за верхний порог хладоломкости T_v принимается температура, обеспечивающая такое состояние. При хрупком состоянии металла (в изломе 10 % волокон) – за нижний порог хладоломкости T_n принимается температура, обеспечивающая такое состояние. В технике за порог хладоломкости принимают температуру, при которой в изломе 50 % вязкой составляющей. Причем эта температура должна быть ниже температуры эксплуатации изделий не менее чем на 40 °С.

Усталость металлов. Испытания на выносливость (ГОСТ 2860) дают характеристики усталостной прочности.

Усталость – разрушение материала при повторных знакопеременных напряжениях, величина которых не превышает предела текучести.

Усталостная прочность (выносливость) – способность материала сопротивляться усталости. Процесс усталости состоит из трех этапов, соответствующие этим этапам зоны в изломе показаны на рис. 3.12.



1 – образование трещины в наиболее нагруженной части сечения, которая подвергалась микродеформациям и получила максимальное упрочнение; 2 – постепенное распространение трещины, гладкая притертая поверхность

3 – окончательное разрушение, зона «долома», живое сечение уменьшается, а истинное напряжение увеличивается, пока не происходит разрушение хрупкое или вязкое

Рис. 3.12. Схема зарождения и развития трещины при переменном изгибе круглого образца

Характеристики усталостной прочности определяются при циклических испытаниях «изгиб при вращении». Схема представлена на рис. 3.13.

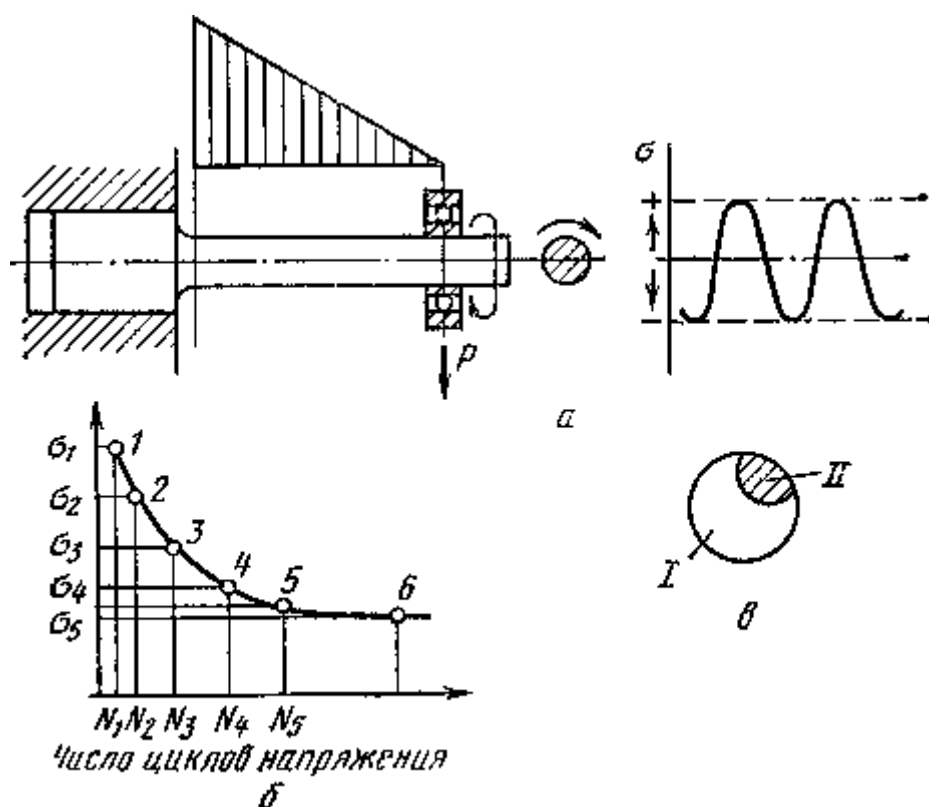


Рис. 3.13. Испытания на усталость (а), кривая усталости (б)

Основные характеристики:

Предел выносливости (σ_{-1} – при симметричном изменении нагрузки, σ_R – при несимметричном изменении нагрузки) – максимальное напряжение, выдерживаемое материалом за произвольно большое число циклов нагружения N .

Ограниченный предел выносливости – максимальное напряжение, выдерживаемое материалом за определенное число циклов нагружения или время.

Живучесть – разность между числом циклов до полного разрушения и числом циклов до появления усталостной трещины.

Таким образом, в результате испытаний получают характеристики:

- силовые (предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, предел прочности, предел выносливости);
- деформационные (относительное удлинение, относительное сужение);
- энергетические (ударная вязкость).

Все они характеризуют общую прочность материала независимо от назначения, конструкции и условий эксплуатации. Высокое качество детали может быть достигнуто только при учете всех особенностей, которые имеют место в процессе работы детали, и которые определяют ее конструкционную прочность. Конструкционная прочность – комплекс прочностных свойств, которые находятся в наибольшей корреляции со служебными свойствами данного изделия, обеспечивают длительную и надежную работу материала в условиях эксплуатации. На конструкционную прочность влияют следующие факторы:

- конструкционные особенности детали (форма и размеры);
- механизмы различных видов разрушения детали;
- состояние материала в поверхностном слое детали;
- процессы, происходящие в поверхностном слое детали, приводящие к отказам при работе.

Необходимым условием создания качественных конструкций при экономном использовании материала является учет дополнительных критериев, влияющих на конструкционную прочность. Этими критериями являются надежность и долговечность.

Надежность – свойство изделий, выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого времени или сопротивление

материала хрупкому разрушению.

Долговечность – способность детали сохранять работоспособность до определенного состояния.

Л.4. Классификация и маркировка металлов и сплавов

Каждому инженеру совершенно необходимо знать классификацию и маркировку материалов, предназначенных для изготовления деталей машин и конструкций. К числу таких материалов относятся металлы и их сплавы, металлические и металлокерамические порошки пластмассы, резина, стекло, керамика, древесные и др. неметаллические вещества. Наиболее широкое распространение в качестве конструкционных материалов в настоящее время получили металлы и их сплавы, поэтому в настоящей работе будут рассмотрены только стали, чугуны и цветные металлы, и их сплавы (медь, алюминий, титан, магний и сплавы на их основе).

Классификация и маркировка сталей.

Сталями принято называть сплавы железа с углеродом, содержание до 2,14% углерода. Кроме того, в состав сплава обычно входят марганец, кремний, сера и фосфор; некоторые элементы могут быть специально введены для улучшения физико-химических свойств (легирующие элементы).

Стали, классифицируют по самым различным признакам. Мы рассмотрим следующие:

1. Химический состав.

В зависимости от химического состава различают стали углеродистые (ГОСТ 380-71, ГОСТ 1050-75) и легированные (ГОСТ 4543-71, ГОСТ 5632-72, ГОСТ 14959-79). В свою очередь углеродистые стали могут быть:

- А) малоуглеродистыми, т. е. содержащими углерода менее 0,25%;
- Б) среднеуглеродистыми, содержание углерода составляет 0,25-0,60%;
- В) высокоуглеродистыми, в которых концентрация углерода превышает 0,60%.

Легированные стали подразделяют на:

- а) низколегированные содержание легирующих элементов до 2,5%;
- б) среднелегированные, в их состав входят от 2,5 до 10% легирующих элементов;
- в) высоколегированные, которые содержат свыше 10% легирующих элементов.

2. Назначение.

По назначению стали бывают:

- конструкционные, предназначенные для изготовления строительных и машиностроительных изделий;
- инструментальные, из которых изготавливают режущий, мерительный, штамповый и прочие инструменты. Эти стали содержат более 0,65% углерода;
- с особыми физическими свойствами, например, с определенными магнитными характеристиками или малым коэффициентом линейного расширения: электротехническая сталь, суперинвар;
- с особыми химическими свойствами, например, нержавеющие, жаростойкие или жаропрочные стали.

3. Качество.

В зависимости от содержания вредных примесей: серы и фосфора, стали подразделяют на:

- стали обыкновенного качества, содержание до 0,06% серы и до 0,07% фосфора.
- качественные - до 0,035% серы и фосфора каждого отдельно;
- высококачественные - до 0,025% серы и фосфора;
- особовысококачественные - до 0,025% фосфора и до 0,015% серы.

4. Степень раскисления.

По степени удаления кислорода из стали (степени ее раскисления) существуют:

- спокойные стали (полностью раскисленные). Такие стали обозначаются буквами «сп» в

конце марки (иногда буквы опускаются);

- кипящие стали (слабо раскисленные); маркируются буквами «кп»;

- полуспокойные стали, занимающие промежуточное положение между двумя предыдущими; обозначаются буквами «пс».

Сталь обыкновенного качества подразделяется еще и по поставкам на 3 группы:

- сталь группы А поставляется потребителям по механическим свойствам (такая сталь может иметь повышенное содержание серы или фосфора);

- сталь группы Б - по химическому составу;

- сталь группы В - с гарантированными механическими свойствами и химическим составом.

В зависимости от нормируемых показателей (предел прочности σ , относительное удлинение $\delta\%$, предел текучести δ_t , изгиб в холодном состоянии) сталь каждой группы делится на категории, которые обозначаются арабскими цифрами.

Стали обыкновенного качества обозначают буквами «Ст» и условным номером марки (от 0 до 6) в зависимости от химического состава и механических свойств. Чем выше содержание углерода и прочностные свойства стали, тем больше ее номер. Буква «Г» после номера марки указывает на повышенное содержание марганца в стали. Перед маркой указывают группу стали, причем группа «А» в обозначении марки стали не ставится. Для указания категории стали к обозначению марки добавляют номер в конце соответствующий категории, первую категорию обычно не указывают.

Например:

Ст1кп2 - углеродистая сталь обыкновенного качества, кипящая, № марки 1, второй категории, поставляется потребителям по механическим свойствам (группа А);

ВСт5Г - углеродистая сталь обыкновенного качества с повышенным содержанием марганца, спокойная, № марки 5, первой категории с гарантированными механическими свойствами и химическим составом (группа В);

Вст0 - углеродистая сталь обыкновенного качества, номер марки 0, группы Б, первой категории (стали марок *Ст0* и *Бст0* по степени раскисления не разделяют).

Качественные стали маркируют следующим образом:

1) в начале марки указывают содержание углерода цифрой, соответствующей его средней концентрации:

а) в сотых долях процента для сталей, содержащих до 0,65% углерода;

05кп – сталь углеродистая качественная, кипящая, содержит 0,05% С;

60 – сталь углеродистая качественная, спокойная, содержит 0,60% С;

б) в десятых долях процента для промышленных сталей, которые дополнительно снабжаются буквой «У»:

У7 – углеродистая инструментальная, качественная сталь, содержащая 0,7% С, спокойная (все инструментальные стали хорошо раскислены);

У12 - углеродистая инструментальная, качественная сталь, спокойная содержит 1,2% С;

2) легирующие элементы, входящие в состав стали, обозначают русскими буквами:

А – азот К – кобальт Т – титан Б – ниобий М – молибден Ф – ванадий

В – вольфрам Н – никель Х – хром Г – марганец

П – фосфор Ц – цирконий Д – медь Р – бор Ю – алюминий

Е – селен С – кремний Ч – редкоземельные металлы

Если после буквы, обозначающей легирующий элемент, стоит цифра, то она указывает содержание этого элемента в процентах. Если цифры нет, то сталь содержит 0,8...1,5% легирующего элемента, за исключением молибдена и ванадия (содержание которых в сталях обычно до 0,2...0,3%), а также бора (в стали с буквой Р его должно быть не менее 0,0010%).

Примеры:

14Г2 – низко легированная качественная сталь, спокойная, содержит приблизительно 14% углерода и до 2,0% марганца.

03Х16Н15МЗБ - высоко легированная качественная сталь, спокойная содержит 0,03% С, 16,0% Cr, 15,0% Ni, до 3,0% Mo, до 1,0% Nb.

Высококачественные и особовысококачественные стали. Маркируют, так же как и ка-

чественные, но в конце марки высококачественной стали ставят букву «А», (эта буква в середине марочного обозначения указывает на наличие азота, специально введенного в сталь), а после марки особовысококачественной – через тире букву «Ш».

Например:

У8А - углеродистая инструментальная высоко качественная сталь, содержащая 0,8% углерода;

30ХГС-Ш – особовысококачественная среднелегированная сталь, содержащая 0,30% углерода и от 0,8 до 1,5% хрома, марганца и кремния каждого.

Отдельные группы сталей обозначают несколько иначе.

Шарикоподшипниковые стали маркируют буквами «ШХ», после которых указывают содержание хрома в десятых долях процента:

ШХ6 - шарикоподшипниковая сталь, содержащая 0,6% хрома;

ШХ15ГС - шарикоподшипниковая сталь, содержащая 1,5% хрома и от 0,8 до 1,5% марганца и кремния.

Быстрорежущие стали (сложнолегированные) обозначают буквой «Р», следующая за ней цифра указывает на процентное содержание в ней вольфрама:

Р18-быстрорежущая сталь, содержащая 18,0% вольфрама;

Р6М5К5-быстрорежущая сталь, содержащая 6,0% вольфрама 5,0% молибдена 5,0% кобальта.

Автоматные стали обозначают буквой «А» и цифрой, указывающей среднее содержание углерода в сотых долях процента:

А12 - автоматная сталь, содержащая 0,12% углерода (все автоматные стали имеют повышенное содержание серы и фосфора);

А40Г - автоматная сталь с 0,40% углерода и повышенным до 1,5% содержанием марганца.

Классификация и маркировка чугунов.

Чугунами называют сплавы железа с углеродом, содержащие более 2,14% углерода. Они содержат те же примеси, что и сталь, но в большем количестве. В зависимости от содержания углерода в чугуне, различают:

- белый чугун, в котором весь углерод находится в связанном состоянии в виде карбида;
- чугун, в котором углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в виде графита, что определяет прочностные свойства сплава. Такие чугуны подразделяют на:

- 1) серые – пластинчатая или червеобразная форма графита;
- 2) высокопрочные – шаровидный графит;
- 3) ковкие – хлопьевидный графит.

Чугуны маркируют двумя буквами и двумя цифрами, соответствующими минимальному значению временного сопротивления σ_B при растяжении в кг/мм². Серый чугун обозначают буквами «СЧ» (ГОСТ 1412-85), высокопрочный – «ВЧ» (ГОСТ 7293-85), ковкий – «КЧ» (ГОСТ 1215-85).

СЧ10 - серый чугун с пределом прочности при растяжении 100 МПа;

ВЧ70 - высокопрочный чугун с сигма временным при растяжении 700 МПа;

КЧ35 - ковкий чугун с σ_B растяжением примерно 350 МПа.

Для работы в узлах трения со смазкой применяют отливки из антифрикционного чугуна АЧС-1, АЧС-6, АЧВ-2, АЧК-2 и др., что расшифровывается следующим образом: АЧ - антифрикционный чугун; С - серый, В - высокопрочный, К - ковкий. А цифры обозначают порядковый номер сплава согласно ГОСТу 1585-79.

Классификация и маркировка цветных сплавов.

1. Медь и ее сплавы.

Технически чистая медь обладает высокими пластичностью и коррозионной стойкостью,

малым удельным электросопротивлением и высокой теплопроводностью. По чистоте медь подразделяют на марки (ГОСТ 859-78):

Марка	МВЧк	МОО	МО	М1	М2	М3
Содержание Cu+Ag, не менее %	99,993	99,99	99,95	99,9	99,7	99,5

После обозначения марки указывают способ изготовления меди: к - катодная, б – бескислородная, р - раскисленная. Медь огневого рафинирования не обозначается.

МООк - технически чистая катодная медь, содержащая не менее 99,99% меди и серебра.

М3 - технически чистая медь огневого рафинирования, содержит не менее 99,5% меди и серебра.

Медные сплавы разделяют на бронзы и латуни. Бронзы – это сплавы меди с оловом (4 - 33% Sn хотя бывают без оловянные бронзы), свинцом (до 30% Pb), алюминием (5...11% Al), кремнием (4...5% Si), сурьмой и фосфором (ГОСТ 493-79 , ГОСТ 613-79, ГОСТ 5017-74, ГОСТ 18175-78).

Латуни – сплавы меди с цинком (до 50% Zn) и небольшими добавками алюминия, кремния, свинца, никеля, марганца (ГОСТ 15527-70, ГОСТ 17711-80). Медные сплавы предназначены для изготовления деталей методами литья, называют литейными, а сплавы, предназначенные для изготовления деталей пластическим деформированием – сплавами, обрабатываемыми давлением.

Медные сплавы обозначают начальными буквами их названия (Бр или Л), после чего следуют первые буквы названий основных элементов, образующих сплав, и цифры, указывающие количество элемента в процентах. Приняты следующие обозначения компонентов сплавов:

А – алюминий	Мц - марганец	С - свинец	Б - бериллий
Мг – магний	Ср – серебро	Ж - железо	Мш - мышьяк
Су – сурьма	К – кремний	Н – никель	Т – титан
Кд – кадмий	О – олово	Ф – фосфор	Х – хром
			Ц - цинк

Примеры:

БрА9Мц2Л - бронза, содержащая 9% алюминия, 2% Мп, остальное Си ("Л" указывает, что сплав литейный);

ЛЦ40Мц3Ж - латунь, содержащая 40% Zn, 3% Мп, ~1% Fe, остальное Си;

Бр0Ф8,0-0,3 - бронза наряду с медью содержащая 8% олова и 0,3% фосфора;

ЛАМш77-2-0,05 - латунь содержащая 77% Си, 2% Al, 0,055 мышьяка, остальное Zn (в обозначении латуни, предназначенной для обработки давлением, первое число указывает на содержание меди).

В несложных по составу латунях указывают только содержание в сплаве меди:

Л96 - латунь содержащая 96% Си и ~4% Zn (томпак);

Л63 - латунь содержащая 63% Си и ~37% Zn.

2. Алюминий и его сплавы.

Алюминий – легкий металл, обладающий высокими тепло- и электропроводностью, стойкий к коррозии. В зависимости от степени чистоты первичный алюминий согласно ГОСТ 11069-74 бывает особой (А999), высокой (А995, А95) и технической чистоты (А85, А7Е, АО и др.). Алюминий маркируют буквой А и цифрами, обозначающими доли процента свыше 99,0% Al; буква «Е» обозначает повышенное содержание железа и пониженное кремния.

А999 - алюминий особой чистоты, в котором содержится не менее 99,999% Al;

А5 - алюминий технической чистоты в котором 99,5% алюминия.

Алюминиевые сплавы разделяют на деформируемые и литейные. Те и другие могут быть не упрочняемые и упрочняемые термической обработкой.

Деформируемые алюминиевые сплавы хорошо обрабатываются прокаткой, ковкой, штамповкой. Их марки приведены в ГОСТ 4784-74.

К деформируемым алюминиевым сплавам, не упрочняемым термообработкой, относят-

ся сплавы системы Al-Mn и Al-Mg: Амц, АмцС, Амг1, Амг4,5, Амг6. Аббревиатура включает в себя начальные буквы, входящие в состав сплава компонентов и цифры, указывающие содержание легирующего элемента в процентах.

К деформируемым алюминиевым сплавам, упрочняемым термической обработкой, относятся сплавы системы Al-Cu-Mg с добавками некоторых элементов (дуралюны, ковошные сплавы), а также высокопрочные и жаропрочные сплавы сложного химического состава. Дуралюмины маркируются буквой «Д» и порядковым номером, например: Д1, Д12, Д18, АК4, АК8.

Чистый деформируемый алюминий обозначается буквами «АД» и условным обозначением степени его чистоты: АДоч ($\geq 99,98\%$ Al), АД000 ($\geq 99,80\%$ Al), АД0 ($99,5\%$ Al), АД1 ($99,30\%$ Al), АД ($\geq 98,80\%$ Al).

Литейные алюминиевые сплавы (ГОСТ 2685-75) обладает хорошей жидкотекучестью, имеет сравнительно небольшую усадку и предназначены в основном для фасонного литья. Эти сплавы маркируются буквами «АЛ» с последующим порядковым номером: АЛ2, АЛ9, АЛ13, АЛ22, АЛ30.

Иногда маркируют по составу: АК7М2; АК21М2,5Н2,5; АК4МЦ6. В этом случае «М» обозначает медь; «К» - кремний; «Ц» - цинк; «Н» - никель; цифра – среднее % содержание элемента.

Из алюминиевых антифрикционных сплавов (ГОСТ 14113-78) изготавливают подшипники и вкладыши, как литьем, так и обработкой давлением. Такие сплавы маркируют буквой «А» и начальными буквами входящих в них элементов: А09-2, А06-1, АН-2,5, АСМТ. В первые два сплава входят в указанное количество олова и меди (первая цифра – олово, вторая – медь в %), в третий 2,7...3,3% Ni и в четвертый медь, сурьма и теллур.

3. Титан и его сплавы.

Титан - тугоплавкий металл с невысокой плотностью. Удельная прочность титана выше, чем у многих легированных конструкционных сталей, поэтому при замене сталей титановыми сплавами можно при равной прочности уменьшить массу детали на 40%. Титан хорошо обрабатывается давлением, сваривается, из него можно изготовить сложные отливки, но обработка резанием затруднительна. Для получения сплавов с улучшенными свойствами его легируют алюминием, хромом, молибденом. Титан и его сплавы маркируют буквами «ВТ» и порядковым номером:

ВТ1-00, ВТ3-1, ВТ4, ВТ8, ВТ14.

Пять титановых сплавов обозначены иначе:

0Т4-0, 0Т4, 0Т4-1, ПТ-7М, ПТ-3В.

4. Магний и его сплавы.

Среди промышленных металлов магний обладает наименьшей плотностью (1700 кг/м³). Магний и его сплавы неустойчивы против коррозии, при повышении температуры магний интенсивно окисляется и даже самовоспламеняется. Он обладает малой прочностью и пластичностью, поэтому как конструкционный материал чистый магний не используется. Для повышения химико-механических свойств в магниевые сплавы вводят алюминий, цинк, марганец и другие легирующие добавки. Магниевые сплавы подразделяют на деформируемые (ГОСТ 14957-76) и литейные (ГОСТ 2856-79). Первые маркируются буквами «МА», вторые «МЛ». После букв указывается порядковый номер сплава в соответствующем ГОСТе.

Например:

МА1-деформируемый магниевый сплав №1;

МЛ19-литейный магниевый сплав №19

В таблице приведены индивидуальные задания по расшифровке марок конструкционных материалов.

	МАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.
1	БСт3кп, 08Х20Н14С2, Р9, СЧ25, М006, Амч3, ВТ1-00, МЛ3
2	11Х11Н2В2МФ, ШХ30, У11, ВЧ45, БрА9Мц2Л, АЛ19, ВТ1-0, МЛ4
3	25ХГС А, Р6М5Ф2К8, 50, КЧ50, БрА7Мц15ЖЗН2Ц2, А6, ОТ4-0, МА1
4	45ХНЗМФА, ШХ9, 20пс, АЧС-4, Бр04Ц7С5, АД0Е, ОТ4-1, МА2
5	10Х17Н13М2Т, А20, Ст6, АЧК-1, БрОФ4-0, 25; АЛ33, ОТ-4, МЛ19
6	Ст5Гпс3, 25Х13Н2, 15кп, АВЧ-1, ЛС63-2, Амц, ВТ5, МЛ15
7	16Х11Н2ВМФ, А40Г, ШХ15, СЧ10, ЛА77-2, Д16, ВТ9, МА18
8	45Х22Н4МЗ, У 13, ВСт2пс2, ВЧ1СО, М2р, АЛ25, ВТ14, МА15
9	31Х19Н9МВБТ, Р9, 45, КЧ45, БрСу3Н3Ц3С20Ф, А8, ВТ16, МЛ5
10	12Х18Н9Т, ШХ15ГС, А20, АЧС-5, ЛЦ40Мц3А, АЛ21, ВТ20, МА17
11	ВСт3пс, 20Х, Р12, АЧВ-2, ЛЖМц59-1-1, АК4М4, ВТ22, МЛ6
12	15Х60Ю, Р6М5, У13А, АЧК-2, ЛС59-1, Д12, ПТ-7М, МЛ10
13	38Х2МЮА, ВСт4пс2, 50Г, АЧС-3, Л68, А5Е, ПТ-3В, МА-12
14	36Х18Н25С2, А30, ВСт2кбп, КЧ60, БрАЖНЮ-4-4, АЛ2, ВТ9, МА11
15	40ХМФА, РОМЗФ2, А30, ВЧ80, БрА7Мц15ЖЗН2Ц2, АК9, ВТ5, МЛ8
16	Ст0, 30Х13, Р6М5Ф2К8, Сч15, БрА9Ж4Н4Мц1, Амг6, ВТ1-0, МА21
17	09Х16Н4Б, ВСт3Г, ШХ6, СЧ18, ЛЦ23А6ЖЗМц2, Д16, ВТ16, МЛ19
18	45ХНЗМФ-Ш, У11, АП, ВЧ70, ЛАМш77-2-0,05, АЛ23, ВТ5.МА18
19	14Г2АФ, РОМ2Ф3, ВСт5сп, СЧ24, Бр0Ф6, 5-0, 15; Д18, ВТ1-00, МА19
20	15Х7Н2Т-Ш, Р6М5Ф2К8, ШХ9, КЧ63, ЛК80-3, АК4М4.ВТ22, МЛ8
21	ВСт1, 50ХГ, РОМЗФ2, АЧС-6, БрКМц3-1, АК7, ВТ20, МЛ12
22	08Х18Т1, У10А, 30пс, ВЧ40, Бр06Ц6С3, АЛ9, ПТ-3В, МА2
23	Р12, 13Х14НВ2ФР, Ст5пс3, СЧ20, ЛЦ38Мц2С2, Амг2, ВТ3, МЛ4
24	У9, 07Х25Н13, ШХ15, КЧ35, БрАЖНМц9-4-4-1, АД0, ВТ14, МА20
25	А11, 20Х12ВНМФ, 25сп, ВЧ80, ЛАНКМц75-2-2, 5-0,5-0,5; А7, ВТ9, МЛ9

Л.5. Железо и сплавы на его основе. Диаграмма состояния «железо – углерод»

Железоуглеродистые сплавы (стали и чугуны) являются важнейшими металлическими сплавами современной техники. Производство чугуна и стали по объему превосходит производство всех других металлов вместе взятых более чем в десять раз.

Диаграмма состояния железо – углерод дает основное представление о строении железоуглеродистых сплавов – сталей и чугунов. Начало изучению диаграммы железо – углерод положил Чернов Д.К. в 1868 году. Чернов впервые указал на существование в стали критических точек и на зависимость их положения от содержания углерода.

Диаграмма железо – углерод должна распространяться от железа до углерода. Железо образует с углеродом химическое соединение: цементит – Fe_3C . Каждое устойчивое химическое соединение можно рассматривать как компонент, а диаграмму – по частям. Так как на практике применяют металлические сплавы с содержанием углерода до 5 %, то рассматриваем часть диаграммы состояния от железа до химического соединения цементита, содержащего 6,67 % углерода. Диаграмма состояния железо – цементит представлена на рис. 5.1.

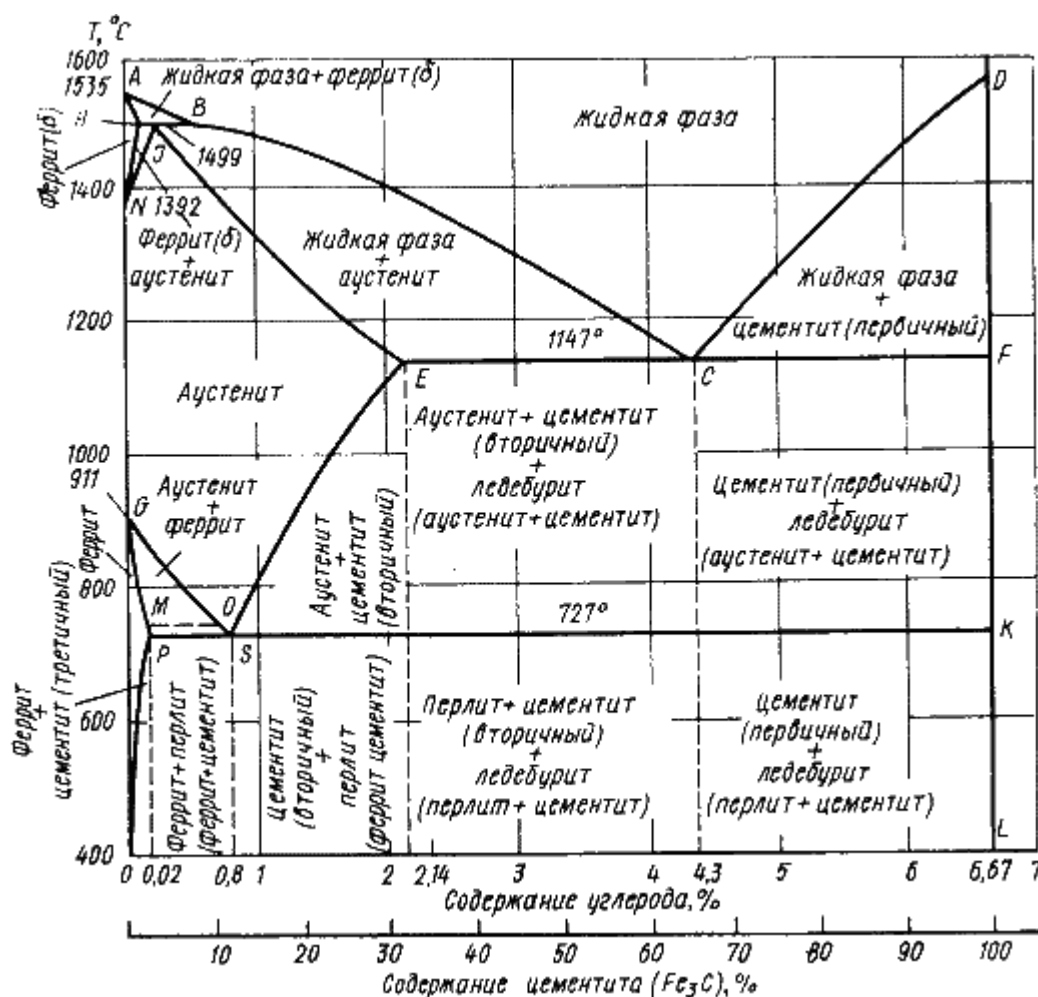


Рис. 5.1. Диаграмма состояния железо - цементит

Компоненты и фазы железоуглеродистых сплавов

Компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо, углерод и цементит.

1. Железо – переходный металл серебристо-светлого цвета. Имеет высокую температуру плавления – $1539 \pm 5^\circ\text{C}$. В твердом состоянии железо может находиться в двух модификациях. Полиморфные превращения происходят при температурах 911°C и 1392°C . При температуре ниже 911°C существует Fe_α с объемно-центрированной кубической решеткой. В интервале температур $911 \dots 1392^\circ\text{C}$ устойчивым является Fe_γ с гранецентрированной кубической решеткой.

ческой решеткой. Выше 1392°C железо имеет объемно-центрированную кубическую решетку и называется Fe_δ или высокотемпературное Fe_α . Высокотемпературная модификация Fe_α не представляет собой новой аллотропической формы. Критическую температуру 911°C превращения $\text{Fe}_\alpha \leftrightarrow \text{Fe}_\gamma$ обозначают точкой A_3 , а температуру 1392°C превращения $\text{Fe}_\alpha \leftrightarrow \text{Fe}_\gamma$ – точкой A_4 .

При температуре ниже 768°C железо ферромагнитное, а выше – парамагнитное. Точка Кюри железа 768°C обозначается A_2 .

Железо технической чистоты обладает невысокой твердостью (80 НВ) и прочностью (предел прочности – 250 МПа, предел текучести – 120 МПа) и высокими характеристиками пластичности (относительное удлинение – 50 %, а относительное сужение – 80 %). Свойства могут изменяться в некоторых пределах в зависимости от величины зерна.

Железо характеризуется высоким модулем упругости, наличие которого проявляется и в сплавах на его основе, обеспечивая высокую жесткость деталей из этих сплавов.

Железо со многими элементами образует растворы: с металлами – растворы замещения, с углеродом, азотом и водородом – растворы внедрения.

2. Углерод. Углерод относится к неметаллам. Обладает полиморфным превращением, в зависимости от условий образования существует в форме графита с гексагональной кристаллической решеткой (температура плавления – 3500°C , плотность – $2,5 \text{ г/см}^3$) или в форме алмаза со сложной кубической решеткой с координационным числом равным четырем (температура плавления – 5000°C).

В сплавах железа с углеродом, углерод находится в состоянии твердого раствора с железом и в виде химического соединения – цементита Fe_3C , а также в свободном состоянии в виде графита (в серых чугунах).

3. Цементит (Fe_3C) – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа), содержит 6,67 % углерода. Аллотропических превращений не испытывает. Кристаллическая решетка цементита состоит из ряда октаэдров, оси которых наклонены друг к другу.

Температура плавления цементита точно не установлена. При низких температурах цементит слабо ферромагнитен, магнитные свойства теряет при температуре около 217°C . Цементит имеет высокую твердость (более 800 НВ, легко царапает стекло), но чрезвычайно низкую, практически нулевую, пластичность. Такие свойства являются следствием сложного строения кристаллической решетки.

Цементит способен образовывать твердые растворы замещения. Атомы углерода могут замещаться атомами неметаллов: азотом, кислородом; атомы железа – металлами: марганцем, хромом, вольфрамом и др. Такой твердый раствор на базе решетки цементита называется легированным цементитом.

Цементит – соединение неустойчивое и при определенных условиях распадается с образованием свободного углерода в виде графита. Этот процесс имеет важное практическое значение при структурообразовании чугунов.

В системе железо – углерод существуют следующие фазы: жидкая фаза, феррит, аустенит, цементит.

1. Жидкая фаза. В жидком состоянии железо хорошо растворяет углерод в любых пропорциях с образованием однородной жидкой фазы.

2. Феррит (Ф) – твердый раствор внедрения углерода в α - железе. Феррит имеет переменную предельную растворимость углерода: минимальную – 0,006 % при комнатной температуре (точка Q), максимальную – 0,02 % при температуре 727°C (точка P). Углерод располагается в дефектах решетки. При температуре выше 1392°C существует высокотемпературный феррит, с предельной растворимостью углерода 0,1 % при температуре 1499°C (точка J). Свойства феррита близки к свойствам железа. Он мягок (твердость – 130 НВ, предел прочности – 300 МПа) и пластичен (относительное удлинение – 30 %), магнитен до 768°C .

3. Аустенит (А) – твердый раствор внедрения углерода в γ - железо. Углерод занимает место в центре гранецентрированной кубической ячейки. Аустенит имеет переменную предельную растворимость углерода: минимальную – 0,8 % при температуре 727°C (точка S), максимальную – 2,14 % при температуре 1147°C (точка E). Аустенит имеет твердость

200...250 НВ, пластичен (относительное удлинение – 40...50 %), парамагнитен. При растворении в аустените других элементов могут изменяться свойства и температурные границы существования.

В железоуглеродистых сплавах присутствуют фазы: цементит первичный (ЦП), цементит вторичный (ЦВ), цементит третичный (ЦТ). Химические и физические свойства этих фаз одинаковы. Влияние на механические свойства сплавов оказывает различие в размерах, количестве и расположении этих выделений. Цементит первичный выделяется из жидкой фазы в виде крупных пластинчатых кристаллов. Цементит вторичный выделяется из аустенита и располагается в виде сетки вокруг зерен аустенита (при охлаждении – вокруг зерен перлита). Цементит третичный выделяется из феррита и в виде мелких включений располагается у границ ферритных зерен.

Процессы при структурообразовании железоуглеродистых сплавов

Линия ABCD – ликвидус системы. На участке АВ начинается кристаллизация феррита, на участке ВС начинается кристаллизация аустенита, на участке CD – кристаллизация цементита первичного.

Линия ANJECF – линия солидус. На участке АН заканчивается кристаллизация феррита. На линии НJB при постоянной температуре 1499 °С идет перетектическое превращение, заключающееся в том, что жидкая фаза реагирует с ранее образовавшимися кристаллами феррита, в результате чего образуется аустенит. На участке JE заканчивается кристаллизация аустенита. На участке ECF при постоянной температуре 1147 °С идет эвтектическое превращение, заключающееся в том, что жидкость, содержащая 4,3 % углерода превращается в эвтектическую смесь аустенита и цементита первичного. Эвтектика системы железо – цементит называется ледебуритом (Л), по имени немецкого ученого Ледебура, содержит 4,3 % углерода. При температуре ниже 727 °С в состав ледебурита входят цементит первичный и перлит, его называют ледебурит превращенный (ЛП).

По линии HN начинается превращение феррита в аустенит, обусловленное полиморфным превращением железа. По линии NJ превращение феррита в аустенит заканчивается.

По линии GS – превращение аустенита в феррит, обусловленное полиморфным превращением железа. По линии PG превращение аустенита в феррит заканчивается.

По линии ES начинается выделение цементита вторичного из аустенита, обусловленное снижением растворимости углерода в аустените при понижении температуры.

По линии MO при постоянной температуре 768 °С имеют место магнитные превращения.

По линии PSK при постоянной температуре 727 °С идет эвтектоидное превращение, заключающееся в том, что аустенит, содержащий 0,8 % углерода, превращается в эвтектоидную смесь феррита и цементита вторичного. По механизму данное превращение похоже на эвтектическое, но протекает в твердом состоянии. Эвтектоид системы железо – цементит называется перлитом (П), содержит 0,8 % углерода. Название получил за то, что на полированном и протравленном шлифе наблюдается перламутровый блеск. Перлит может существовать в зернистой и пластинчатой форме, в зависимости от условий образования.

По линии PQ начинается выделение цементита третичного из феррита, обусловленное снижением растворимости углерода в феррите при понижении температуры.

Температуры, при которых происходят фазовые и структурные превращения в сплавах системы железо – цементит, т.е. критические точки, имеют условные обозначения. Они обозначаются буквой А (от французского *arrêt* – остановка):

А₁ – линия PSK (727 °С) – превращение перлита в аустенит;

А₂ – линия MO (768 °С, т. Кюри) – магнитные превращения;

А₃ – линия GOS (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) – превращение феррита в аустенит;

А₄ – линия NJ (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) – превращение аустенита в феррит;

A_{cm} – линия SE (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) – начало выделения цементита вторичного (иногда обозначается A_3).

Так как при нагреве и охлаждении превращения совершаются при различных температурах, чтобы отличить эти процессы вводятся дополнительные обозначения. При нагреве добавляют букву с, т.е. A_{c1} , при охлаждении – букву r, т.е. A_{r1} .

Структуры железоуглеродистых сплавов

Все сплавы системы железо – цементит по структурному признаку делят на две большие группы: стали и чугуны. Особую группу составляют сплавы с содержанием углерода менее 0,02% (точка P), их называют техническое железо. Микроструктуры сплавов представлены на рис.9.2. Структура таких сплавов после окончания кристаллизации состоит или из зерен феррита (рис. 5.2 а), при содержании углерода менее 0,006 %, или из зерен феррита и кристаллов цементита третичного, расположенных по границам зерен феррита (рис. 5.2.б), если содержание углерода от 0,006 до 0,02 %.

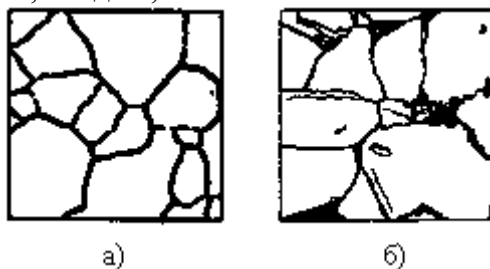


Рис. 5.2. Микроструктуры технического железа:

а – содержание углерода менее 0,006%; б – содержание углерода 0,006...0,02 %

Углеродистыми сталями называют сплавы железа с углеродом, содержащие 0,02...2,14 % углерода, заканчивающие кристаллизацию образованием аустенита. Они обладают высокой пластичностью, особенно в аустенитном состоянии. Структура сталей формируется в результате перекристаллизации аустенита. Микроструктуры сталей представлены на рис. 5.3.

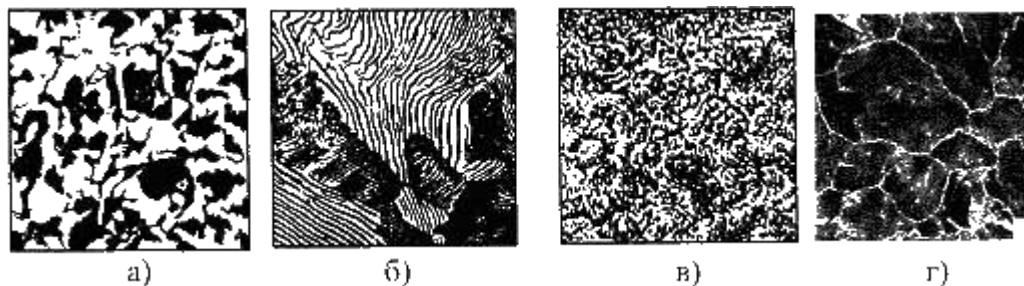


Рис. 5.3. Микроструктуры сталей:

а – доэвтектоидная сталь; б – эвтектоидная сталь (пластинчатый перлит);
в – эвтектоидная сталь (зернистый перлит); г – заэвтектоидная сталь.

По содержанию углерода и по структуре стали подразделяются на доэвтектоидные, структура феррит + перлит (рис. 5.3 а); эвтектоидные, структура перлит (П), перлит может быть пластинчатый или зернистый (рис. 5.3 б и 5.3 в); заэвтектоидные, структура перлит + цементит вторичный (П + ЦП), цементитная сетка располагается вокруг зерен перлита.

По микроструктуре сплавов можно приблизительно определить количество углерода в составе сплава, учитывая следующее: количество углерода в перлите составляет 0,8 %, в цементите – 6,67 %. Ввиду малой растворимости углерода в феррите, принимается, что в нем углерода нет.

Сплавы железа с углеродом, содержащие углерода более 2,14 % (до 6,67 %), заканчивающие кристаллизацию образованием эвтектики (ледебурита), называют чугунами. Наличие легкоплавкого ледебурита в структуре чугунов повышает их литейные свойства. Чугуны,

кристаллизующиеся в соответствии с диаграммой состояния железо – цементит, отличаются высокой хрупкостью. Цвет их излома – серебристо-белый. Такие чугуны называются белыми чугунами. Микроструктуры белых чугунов представлены на рис. 5.4.



Рис. 5.4. Микроструктуры белых чугунов:
а – доэвтектический белый чугун; б – эвтектический белый чугун (Л);
в – заэвтектический белый чугун.

По количеству углерода и по структуре белые чугуны подразделяются на: доэвтектические, структура перлит + ледебурит + цементит вторичный; эвтектические, структура ледебурит (Л) (рис. 5.4 б); заэвтектические, структура ледебурит + цементит первичный (рис. 5.4 в).

В структуре доэвтектических белых чугунов присутствует цементит вторичный, который образуется в результате изменения состава аустенита при охлаждении (по линии ES). В структуре цементит вторичный сливается с цементитом, входящим в состав ледебурита.

Фазовый состав сталей и чугунов при нормальных температурах один и тот же, они состоят из феррита и цементита. Однако свойства сталей и белых чугунов значительно различаются. Таким образом, основным фактором, определяющим свойства сплавов системы железо – цементит является их структура.