

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Ж.Г. Ковалевская, В.П. Безбородов

**ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ.
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2009

УДК 620.22
ББК 30.3я73
К 562

Ковалевская Ж.Г., Безбородов В.П.

К 562

Основы материаловедения. Конструкционные материалы: учебное пособие / Ж.Г. Ковалевская, В.П. Безбородов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 110 с.

Пособие составлено, преимущественно, на основе материалов различных авторов: учебников, монографий, статей и пособий. В учебном пособии в краткой форме изложены классификация конструкционных материалов по их природе, методы анализа строения и свойств материалов, атомно-кристаллическое строение и фазово-структурный состав основных конструкционных материалов. Представлены металлические, керамические материалы, пластмассы и композиты, наиболее широко используемые в промышленности. Описаны методы воздействия на строение материалов с целью получения оптимальных эксплуатационных свойств.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и 140200 «Электроэнергетика».

УДК 620.22
ББК 30.3я73

Рецензенты

доктор физико-математических наук, профессор ТГАСУ
Ю. П. Шаркеев

доктор технических наук, профессор, руководитель Межотраслевого научно-технического центра «Сварка»
Ю.Н. Сараев

© Ковалевская Ж.Г., Безбородов В.П., 2009
© Томский политехнический университет, 2009
© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2009

ВВЕДЕНИЕ

Основная задача учебного пособия – помочь студентам сформировать представление о конструкционных материалах, способах и технологии их получения и обработки, структуре и свойствах, методах оценки качества.

В пособии дана классификация основных конструкционных материалов, используемых в современном производстве. Описываются строение металлов и сплавов на их основе, дефекты кристаллического строения и способы, позволяющие осуществлять упрочнение материалов. Представлены двойные диаграммы состояния сплавов. Отдельный раздел посвящен основным металлическим сплавам, используемым в производстве, в том числе сталям, чугунам, сплавам на основе алюминия, титана, меди. Неметаллические материалы также вынесены в отдельный раздел. В него входит описание строения, свойств и областей применения полимеров, керамических материалов и композитов. Внимание уделено новым направлениям в развитии материаловедения – созданию аморфных, монокристаллических и нанокристаллических материалов.

Авторы благодарят за предоставление иллюстративного материала сотрудников кафедры Материаловедения и технологии конструкционных материалов Томского политехнического университета О.М. Утьева, Н.В. Мартюшева, И.А. Хворову, Е.П. Чинкова, сотрудников Института физики прочности и материаловедения СО РАН А.Ю. Ерошенко, к. ф.-м. н. Е.В. Легостаеву, к. ф.-м. н. Е.Г. Астафурову, заведующего лабораторией физики наноструктурных биокompозитов д. ф.-м. н. Ю.П. Шаркеева, заведующего лабораторией физики пластичности и прочности Сибирского физико-технического института д. ф.-м. н. Ю.И. Чумлякова, сотрудника Института машиноведения УрО РАН д.т.н. Н.Б. Пугачеву.

1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ. МЕТОДЫ АНАЛИЗА СТРОЕНИЯ. ОЦЕНКА СВОЙСТВ

1.1. Классификация конструкционных материалов

При выборе материала для той или иной детали или конструкции учитывают экономическую целесообразность его применения (соответствие цены и качества), сохранение конструкционных критериев (требуемые долговечность, прочность, надежность) и возможность переработки в изделие (технологические критерии – обрабатываемость резанием, свариваемость, ковкость и т.п.). С учетом данных критериев выбирают материал той или иной природы. Материалы делятся на *металлические, неметаллические и композиционные* (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Схема классификации конструкционных материалов

Металлические материалы. К ним относятся все металлы и их сплавы. Среди них можно выделить несколько групп, отличающихся друг от друга по свойствам: 1. Черные металлы. Это железо и сплавы на его основе – стали и чугуны; 2. Цветные металлы. В эту группу входят металлы и их сплавы, такие как медь, алюминий, титан, никель и др.; 3. Благородные металлы. К ним относятся золото, серебро, платина; 4. Редкоземельные металлы. Это лантан, неодим, празеодим.

Неметаллические материалы. Среди них также можно выделить несколько групп: 1. Пластмассы. Это материалы на основе высокомоле-

кулярных соединений – полимеров, как правило, с наполнителями; 2. Керамические материалы (керамика). Основой этих материалов являются порошки тугоплавких соединений типа карбидов, боридов, нитридов и оксидов. Например: TiC, SiC, Cr₇C₃, CrB, Ni₃B, TiB₂, BN, TiN, Al₂O₃, SiO₂, ZrO₂ и др.; 3. Металлокерамические материалы (металлокерамика). В этих материалах основой является керамика, в которую добавляется некоторое количество металла, являющегося связкой и обеспечивающего такие свойства, как пластичность и вязкость; 4. Стекло. Оно представляет собой систему, состоящую из оксидов различных элементов, в первую очередь оксида кремния SiO₂; 5. Резина. Это материалы на основе каучука - углеродводородного полимера с добавлением серы и других элементов; 6. Дерево. Сложная органическая ткань древесных растений.

Композиционные материалы. Они представляют собой композиции, полученные искусственным путем из двух и более разнородных материалов, сильно отличающихся друг от друга по свойствам. В результате композиция существенно отличается по свойствам от составляющих компонентов, т.е. получаемый материал имеет новый комплекс свойств. В состав композиционных материалов могут входить как металлические, так и неметаллические составляющие.

Удельная доля применения в технике этих материалов различна. Мировой объем производства в год основных материалов следующий: сталь – 700 млн. т., конструкционного чугуна – 46 млн. т., пластических масс – 100 млн. т., конструкционных стекла и керамики – 180 млн. т., алюминий – 12 млн. т., медь – 7 млн. т., никель – 0,5 млн. т. (данные 1998 г.). Как видно, *наиболее широко применяются металлические материалы*. Например, в машиностроении их доля достигает 95%. Однако наибольшие темпы роста производства у композиционных материалов.

1.2. Методы изучения строения конструкционных материалов

Существует много разнообразных способов, при помощи которых изучают строение материалов. В данном параграфе представлены лишь основные методы анализа внутреннего строения металлических материалов. Многие из представленных методов используются и для оценки строения неметаллических и композиционных материалов.

Определение химического состава. Для определения химического состава используются методы количественного анализа. 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*.

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

Структурный анализ. Существуют понятия макроструктуры, микроструктуры и субмикроструктуры материалов.

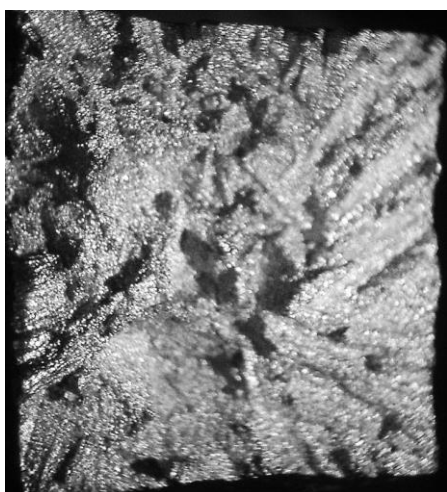


Рис. 1.2. Излом бронзовой отливки ($\times 50$)

Макроструктурный анализ – изучение структуры материалов визуально или с помощью простейших оптических приборов с увеличением до 50 крат. Наиболее доступным при этом является изучение *изломов* (рис. 1.2). Для металлов и сплавов мелкокристаллический излом соответствует лучшему качеству – более высоким механическим свойствам. На изломах, например, в сталях легко наблюдаются дефекты: крупное зерно, грубая волокнистость, трещины, раковины и т.п. Другим способом макроисследования является изучение строения металлических материалов на специальных *темплетах* (образцах).

После травления специальными растворами шлифованной поверхности темплета на ней выявляется кристаллическая структура, волокнистость, дендритное строение, неоднородность металла.

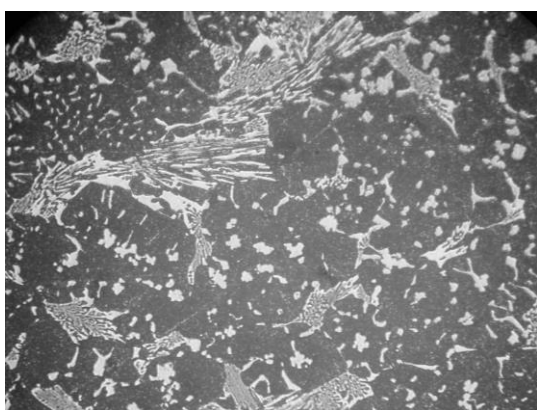


Рис. 1.3. Микроструктура литейной легированной стали ($\times 500$)

Например, травление поперечного среза сварного шва дает возможность выявить места непровара, пузыри, зону термического влияния, трещины и т.п.

Микроструктурный анализ (рис. 1.3) – изучение поверхности при помощи световых микроскопов. Увеличение составляет от 50 до 2000 крат. Позволяет обнаружить элементы структуры размером до 0,2 мкм. Образцами яв-

ляются *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.

Для *анализа субмикроструктуры* (структуры внутри зерен), кроме световых микроскопов, используют электронные микроскопы с большой разрешающей способностью (увеличение до миллиона крат). 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, соответствующие по своим размерам межатомным расстояниям.

В *просвечивающем электронном микроскопе* поток электронов проходит через изучаемый объект. Изображение является результатом неодинакового рассеяния электронов на объекте (рис. 1.4).

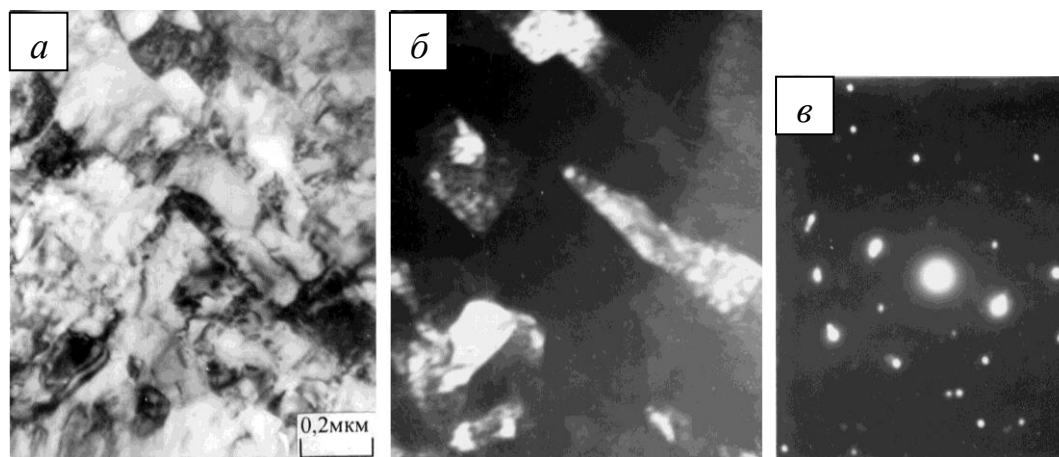


Рис. 1.4. Изображение субзерен феррита в стали 20, полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии: а – светлое поле; б – темное поле в рефлексе $[110]$ α -Fe; в – микроэлектронোগрамма ($\times 50000$).

При прямом методе изучают тонкие металлические фольги, толщиной до 300 нм, на просвет. Фольги получают непосредственно из изучаемого сплава последовательно механическим и ионным утонением. Для идентификации фаз, присутствующих в материале, применяется дифракционный анализ с использованием темнопольной методики (рис. 1.4б,в). Изображение тонкой структуры материала – светлопольное изображение (рис. 1.4а) используется для анализа строения субзе-

ренной структуры, характера расположения дефектов кристаллического строения, оценки внутренних напряжений.

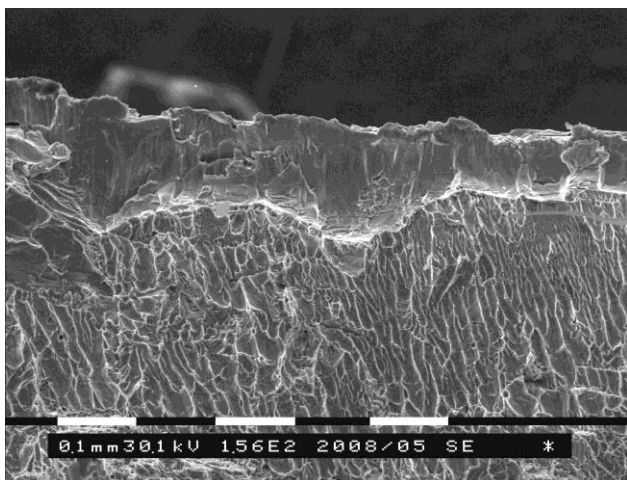


Рис. 1.5. Изображение излома поверхностного слоя титана, полученное с помощью растровой электронной микроскопии ($\times 1000$)

Атомно-силовой микроскоп основан на принципе взаимодействия между поверхностью исследуемого образца и острой вольфрамовой иглой длиной в несколько микрометров, закрепленной на свободном конце кантилевера (кронштейна). Межатомные силы между иглой и атомами поверхности образца заставляют кантилевер изгибаться.

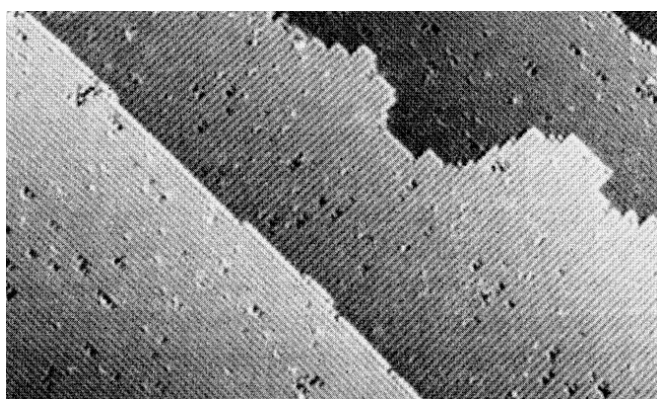


Рис. 1.6. Изображение выхода на поверхность кристаллографических плоскостей кремния, полученное с помощью атомно-силовой микроскопии ($\times 200000$)

В растровом электронном микроскопе изображение создается за счет вторичной эмиссии электронов, излучаемых поверхностью, на которую падает непрерывно перемещающийся по этой поверхности поток первичных электронов. Изучается непосредственно поверхность металла, чаще всего изломы (рис. 1.5). Разрешающая способность растровых электронных микроскопов несколько ниже, чем у просвечивающих микроскопов.

Измеряя отклонение кантилевера в ходе сканирования иглой поверхности, получают картину топографии поверхности. Пьезоэлектрический преобразователь обеспечивает контроль положения иглы по отношению к поверхности образца с высокой точностью, получая карту поверхности в нанометровом или атомном масштабе (рис. 1.6).

Для изучения атомно-кристаллического строения твердых тел используется *рентгеноструктурный метод анализа*, позволяющий определять качественный и количественный фазовый состав сплавов, особенности субструктуры, тип твердых растворов, параметры кристаллических решеток, плотность линейных дефектов, микронапряжения и др. Метод основан на эффекте упругого взаимодействия рентгеновского излучения с исследуемым материалом. Взаимодействие волны с атомами кристаллической решетки приводит к ее дифракции и преимущественному рассеянию в некоторых направлениях. Пример дифракционного спектра приведен на рис. 1.7.

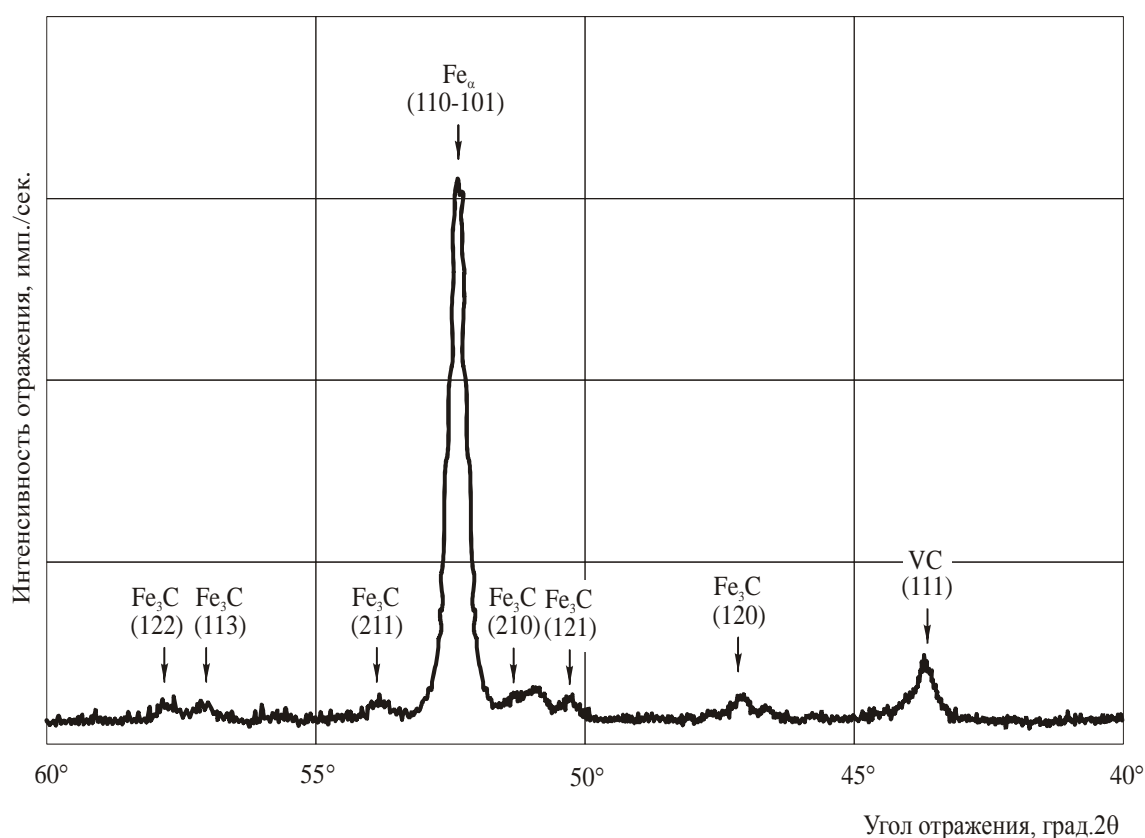


Рис. 1.7. Дифрактограмма литейной стали марки 260Х6ВФ9 с указанием идентифицированных рефлексов основных фаз (α -Fe, карбидов Fe_3C и VC)

Направление (углы) и интенсивность дифракционных максимумов (рефлексов) определяют параметры кристаллической решетки и другие показатели кристаллического строения.

1.3. Оценка свойств конструкционных материалов

Физические свойства металлов. К физическим свойствам металлов относят плотность, температуру плавления, теплопроводность, тепловое расширение, теплоемкость, электропроводность, магнитные свойства.

Цветом называют способность металла отражать падающие на него световые лучи; например, медь красноватого цвета, алюминий – серебристо-белого. *Плотность* характеризуется массой, заключенной в единице объема. *Температура плавления* – температура перехода из твердого состояния в жидкое. Температура плавления железа 1539°C, олова – 232°C, меди – 1083°C. *Теплопроводность* – способность металлов поглощать тепло и отдавать его при охлаждении. Лучшей теплопроводностью обладают серебро, медь, алюминий. Теплопроводность учитывается в теплотехнических расчетах. *Тепловое расширение* – способность металла расширяться при нагревании и сжиматься при охлаждении. Это свойство учитывают при строительстве мостовых ферм, железнодорожных путей, при изготовлении подшипников скольжения. *Теплоемкостью* называют способность металла при нагревании поглощать определенное количество теплоты. *Электропроводность* – способность металла проводить электрический ток. Для токонесущих проводов используют медь и алюминий с высокой электропроводностью, а в электронагревательных приборах и печах применяют сплавы с высоким *электросопротивлением* (нихром, константан, манганин).

Магнитными свойствами, т. е. способностью намагничиваться, обладают железо, никель, кобальт и их сплавы; их называют ферромагнитными. Они имеют огромное промышленное значение: используются в электродвигателях, генераторах, трансформаторах, телефонной, телеграфной технике и т. д. Иногда необходимы немагнитные материалы. Их получают, изменяя состав и внутреннее строение сплавов.

Химические свойства металлов. Химические свойства – это способность металлов и сплавов противостоять окислению и разрушению под действием внешней среды: влаги, воздуха, кислот и т. д. Химическое разрушение под действием указанных факторов называют *коррозией* металлов. Коррозия приносит огромный вред.

Механические свойства определяют способность металлов сопротивляться воздействию внешних сил. Они зависят от химического состава металлов, их структуры, способа технологической обработки и других факторов. Зная механические свойства, можно судить о поведении металла при обработке и в процессе работы конкретных

механизмов. По характеру действия на металл различают три вида нагрузок: *статические* – действующие постоянно или медленно возрастающие: *динамические* – действующие мгновенно, принимающие характер удара: *циклические* или *знакопеременные*, изменяющиеся или по величине, или по направлению, или одновременно и по величине, и по направлению.

К основным механическим свойствам металлов относят прочность, твердость, упругость, пластичность, ударную вязкость. *Прочность* – способность металла сопротивляться разрушению или появлению остаточных деформаций под действием внешних сил. Большое значение имеет *удельная прочность*, ее находят отношением предела прочности к плотности металла. Для стали прочность выше, чем для алюминия, а удельная прочность ниже. *Твердость* – это способность металла сопротивляться поверхностной деформации под действием более твердого тела. *Упругость* – способность металла возвращаться к первоначальной форме после прекращения действия сил. *Пластичность* – свойство металла изменять свои размеры и форму под действием внешних сил, не разрушаясь при этом. *Ударная вязкость* – способность металла сопротивляться разрушению под действием динамической нагрузки. Кроме указанных механических свойств можно назвать усталость (выносливость), ползучесть и др.

Характеристики прочности и пластичности металлов обычно определяют при испытаниях на статическое растяжение. При этом испытываемый образец закрепляют в захватах разрывной машины и деформируют при плавно возрастающей (статической) нагрузке.

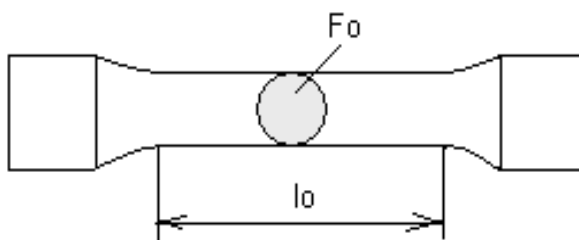


Рис.1.8. Стандартный образец для испытания на растяжение

Чтобы исключить влияние размеров образца, испытание проводят на стандартных образцах с определенным соотношением между расчетной длиной l_0 и площадью поперечного сечения F_0 . Наиболее широко применяются образцы круглого сечения (рис. 1.8).

По результатам испытаний строят диаграммы растяжения образца в координатах «нагрузка – деформация» (рис. 1.9) или «напряжение – деформация».

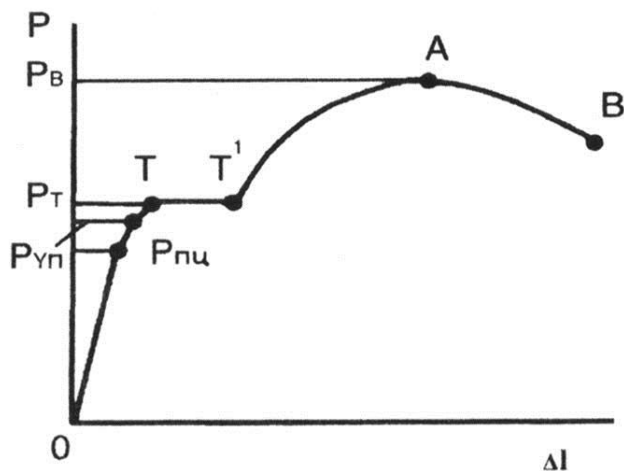


Рис.1.9. Диаграмма растяжения образца из низкоуглеродистой стали

На диаграмме по кривой растяжения определяют следующие характеристики механических свойств металла:

Предел упругости σ_y – максимальное напряжение, до которого образец испытывает только упругую деформацию.

$$\sigma_y = P_y / F_o, \text{ МПа.}$$

Если напряжения меньше σ_y , металл работает в области упругой деформации. У большинства металлов пределы пропорциональности и упругости близки по величине, поэтому в основном указывают предел упругости: $\sigma_y \approx \sigma_{0,02}$

Предел текучести σ_T – это напряжение при котором происходит увеличение деформации при постоянной нагрузке.

$$\sigma_T = P_T / F_o, \text{ МПа.}$$

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ – это напряжение, при котором остаточная деформация равна 0,2% от начальной длины.

Предел прочности (временное сопротивление разрыву) σ_B – это напряжение максимальной нагрузки, которую выдерживает образец до разрушения:

$$\sigma_B = P_B / F_o, \text{ МПа.}$$

Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к разрушению образца.

Кроме характеристик прочности, определяют также характеристики пластичности. Основными характеристиками пластичности металлов являются относительное удлинение и относительное сужение.

Относительное удлинение (δ) измеряется в процентах и определяется по формуле:

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

где l_0 и l_x – начальная и конечная длины образца до и после разрыва.

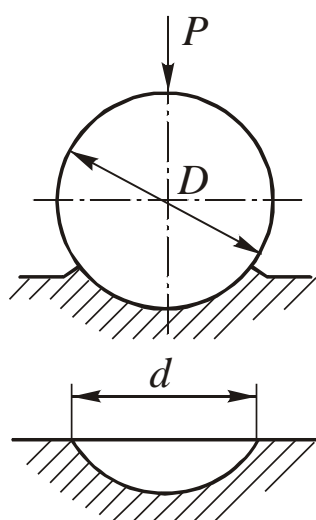
Относительное сужение (Ψ) также измеряется в процентах и определяется по формуле:

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

где F_0 и F_k – начальная и конечная площади поперечного сечения образца до и после испытания (разрушения).

Испытание на твёрдость – один из основных методов оценки качества изделия. Наибольшее распространение на практике получили методы измерения твёрдости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу и метод измерения микротвёрдости.

Твёрдость по Бринеллю (НВ) определяют вдавливанием в поверхность металла стального закаленного шарика диаметром 2,5; 5 и 10 мм (рис.1.10). Прикладываемая нагрузка задается в зависимости от вида



испытываемого материала и размера образца. Число твёрдости НВ определяют отношением нагрузки (P) к площади сферической поверхности отпечатка (F):

$$HB = \frac{P}{F}.$$

Если вычислить поверхность отпечатка, имеющего форму шарового сегмента, то НВ определится формулой

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

Рис. 1. 10. Схема измерения твердости по Бринеллю

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

Обычно расчёты не производят, а пользуются готовыми стандартными таблицами, с помощью которых по диаметру полученного отпечатка (лунки) определяют число твёрдости НВ.

Твёрдость по Роквеллу определяют вдавливанием в поверхность алмазного конуса с углом при вершине 120° или стального закалённого шарика ($D = 1,6$ мм). Конус применяют для металлов с твёрдостью больше 230 НВ, а шарик – для металлов с твердостью меньше этой величины. Твёрдость определяется по глубине впадины (рис. 1.11).

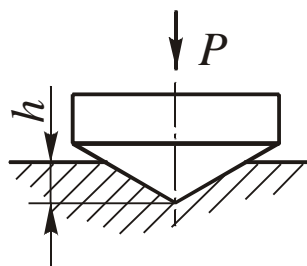


Рис. 1.11. Схема измерения твердости по Роквеллу

Твёрдость по Роквеллу в зависимости от твёрдости испытуемых материалов обозначают HRA, HRB, HRC.

Шкала С служит для испытания твердых материалов, имеющих твердость по Бринеллю от 230 до 700 кгс/мм², например закаленной стали. Алмазный конус вдавливается под нагрузкой 150 кгс. Интервал измерения твердости по шкале С – от 22 до 68 единиц, твердость обозначается HRC.

Шкала А используется при испытании очень твердых материалов, например твердых сплавов или тонких поверхностных слоев (0,5...1,0 мм). Применяют тот же алмазный конус, но вдавливают под нагрузкой в 60 кгс. Значение твердости определяют по шкале С, но обозначают HRA. Интервал измерения твердости по этой шкале от 70 до 85 единиц.

Шкала В предназначена для испытания мягких материалов, имеющих твердость по Бринеллю от 60 до 230 кгс/мм², например бронзы. Стальной шарик диаметром 1,59 мм вдавливается под нагрузкой в 100 кгс. Твердость измеряется в пределах от 25 до 100 единиц шкалы В и обозначается HRB.

Преимуществами способа измерения твёрдости по Роквеллу являются быстрота измерений, возможность измерять твёрдость закаленных сталей и других очень твердых материалов, а также тонких изделий, покрытий и слоёв толщиной до 0,4 – 0,7 мм.

Твёрдость по Виккерсу определяют вдавливанием в поверхность алмазной четырехгранной пирамиды с углом между противоположными гранями $\alpha = 136^\circ$. Нагрузка от 5 до 100 кг. Измеряются обе диагонали отпечатка алмазной пирамиды. Используются таблицы для определения числа твёрдости по среднеарифметической длине диагоналей.

Преимущества метода Виккерса: можно измерять твёрдость как мягких, так и особо твёрдых металлов и сплавов; можно измерять твёрдость поверхностных слоёв после закалки, наклёпа, цементации, азотирования, а также твёрдость покрытий; высокая точность метода.

Метод измерения микротвёрдости предназначен для определения твёрдости структурных составляющих и фаз в металлах, а также очень

тонких поверхностных слоёв и покрытий толщиной в сотые доли миллиметра. Метод измерения микротвёрдости аналогичен методу Виккерса. Различие в том, что четырехгранная пирамида в первом методе имеет меньшие размеры, и используются меньшие нагрузки: от 5 до 500 г. Прибор для измерения микротвёрдости имеет обозначение ПМТ – 3.

К современным методам оценки сопротивления материала вдавлению относится *наноиндентирование*, когда с помощью трехгранной или четырехгранной алмазной пирамиды, внедряемой в испытуемый образец с нагрузкой от 0,01 Н до 0,3 Н, строится диаграмма нагружения и снятия нагрузки, позволяющая оценить характеристики мельчайших структурных составляющих – наноразмерных объектов (рис. 1.12).

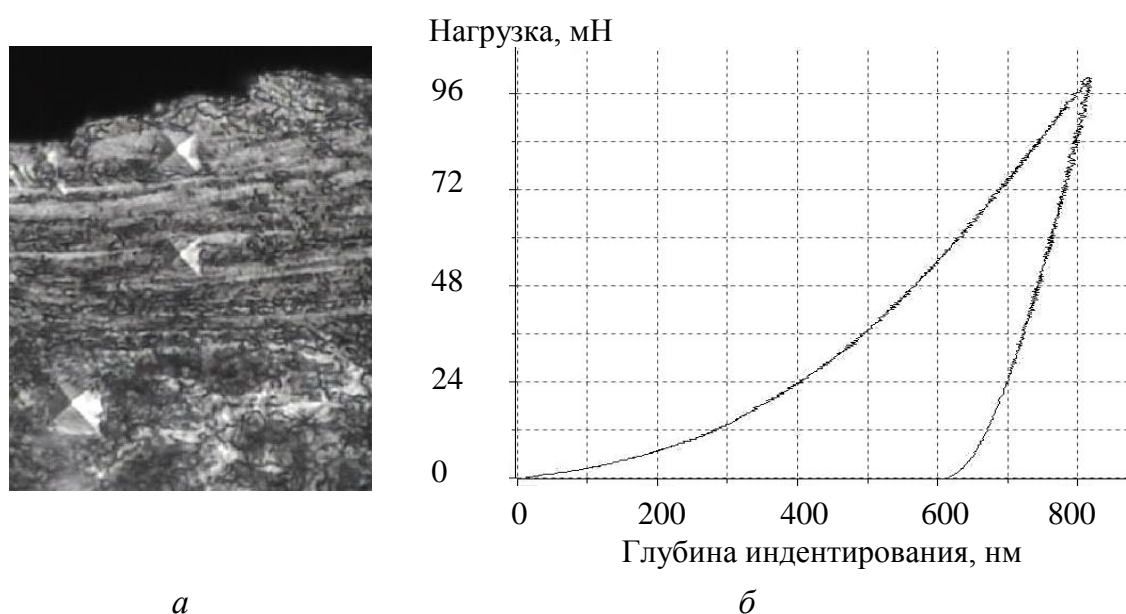


Рис. 1.12. Отпечатки нанотвердости на поперечном шлифе стали 60 ($\times 1000$) (а) и диаграмма нагружения при наноиндентировании (б)

Оценку ударной вязкости металлов проводят на маятниковых копрах. Для ударных испытаний используют надрезанные образцы. Вязкость оценивают по величине нагрузки, а также по виду излома образцов: кристаллическому – для хрупких материалов и волокнистому – для пластичных. Ударную вязкость обозначают КСV, КСУ и КСТ, где КС – символ ударной вязкости, третий символ показывает вид надреза: острый (V), с радиусом закругления (U), трещина (T).

Для проведения испытания образец устанавливают на маятниковом копре (рис. 1.12) надрезом в сторону, противоположную удару маятника, который поднимают на определенную высоту. На разрушение образца затрачивается работа:

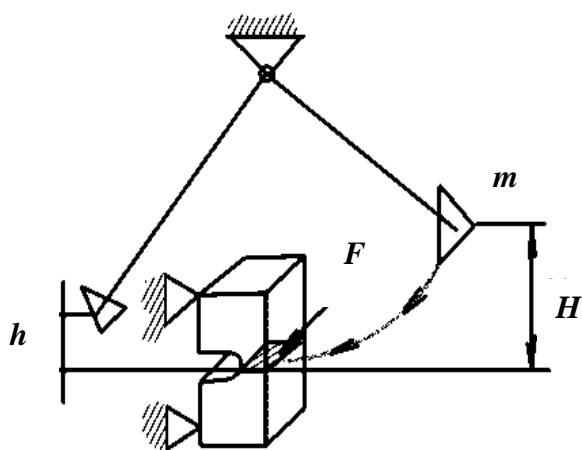


Рис. 1.12. Схема испытания на ударную вязкость

$$A = P \cdot (H - h),$$

где P – вес маятника, H и h – высоты подъема маятника до и после удара.

Значение ударной вязкости определяется по формуле:

$$KCV = \frac{A}{F_0} \left[\frac{\text{кгм}}{\text{см}^2} \right] \text{ или } \left[\frac{\text{МДж}}{\text{м}^2} \right],$$

где A – работы разрушения, F_0 – площади поперечного сечения в месте надреза.

Известно, что большая часть поломок деталей машин вызвана *усталостью материала*.

Как правило, усталостное разрушение происходит как бы внезапно, без заметных признаков пластической деформации. Усталостное разрушение развивается в деталях, работающих при напряжениях меньше предела текучести металла (σ_T). Образование усталостной трещины связано со строением металла – наличием различно ориентированных зёрен, неметаллических включений, пор, дислокаций и других дефектов кристаллической решетки. Свойство металла сопротивляться усталости называется *выносливостью*.

В таблице 1.1. приводятся данные механических свойств некоторых металлов.

Таблица 1.1.

Механические свойства металлов

Металл	Обозначение	σ_b , МПа	δ , %	НВ
Алюминий	Al	80-110	40	20-37
Вольфрам	W	1100	-	160
Железо	Fe	250-350	21-55	50
Магний	Mg	170-210	15	25
Медь	Cu	200	60	35
Никель	Ni	400-500	40	60
Олово	Sn	20-40	44	5-10
Свинец	Pb	18	50	4-6
Титан	Ti	300-450	20-28	85
Цинк	Zn	150	5-20	30-42

Технологические свойства характеризуют способность металлов и сплавов подвергаться обработке различными способами (литьем, давлением, сваркой, резанием). К технологическим свойствам относятся литейные свойства, ковкость, свариваемость, обрабатываемость резанием.

Технологические свойства определяются при технологических испытаниях (пробах), которые дают качественную оценку пригодности металлов и сплавов к различным способам обработки.

Готовые изделия и заготовки для дальнейшей обработки производятся путем *литья* или *обработки давлением*.

Сплавы, предназначенные для получения деталей литьем, называются *литейными*. *Литейные свойства* металлов и сплавов характеризуют их способность образовывать отливки без трещин, раковин и других дефектов. Основными литейными свойствами являются жидкотекучесть, усадка, трещиностойкость, газонасыщение.

Сплавы, предназначенные для получения деталей обработкой давлением, называют *деформируемыми*. Такие сплавы должны обладать *деформируемостью (ковкостью)* – способностью металла обрабатываться давлением при ковке, штамповке, прокатке, т. е. принимать нужную форму под действием удара или давления в нагретом или холодном состоянии без признаков разрушения.

Для получения неразъемных соединений материалов используется *технологический процесс сварки*. Свариваемые материалы обладают способностью образовывать прочное сварное соединение – *свариваемостью*. Хорошей свариваемостью обладает низкоуглеродистая сталь, труднее сварить чугун и цветные металлы.

Обрабатываемостью резанием называют способность металла поддаваться обработке резанием. Металлы и сплавы, имеющие высокую твердость, плохо поддаются обработке резанием. Также плохо обрабатываются резанием вязкие металлы с низкой твердостью.

Эксплуатационные свойства. К эксплуатационным (служебным) свойствам относятся жаростойкость, жаропрочность, износостойкость, коррозионная стойкость и др.

Жаростойкость характеризует способность металлического материала сопротивляться окислению в газовой среде при высокой температуре. *Жаропрочность* характеризует способность материала сохранять механические свойства при высокой температуре. *Износостойкость* – это способность материала сопротивляться разрушению его поверхностных слоев при трении. *Коррозионная стойкость* характеризует способность металлов сопротивляться коррозии в различных средах.

2. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Кристаллическое строение металлов

Из встречающихся на Земле 92 элементов около 80 являются металлами. Все металлы имеют общие характерные свойства: пластичность, высокие тепло- и электропроводность, металлический блеск и т.д. Подобными свойствами обладают и металлические сплавы – вещества, состоящие из двух или более элементов.

Свойства металлов, отличающие их от других веществ, обусловлены особенностями их внутреннего строения. Любой металл можно представить состоящим из большого числа атомов, в которых положительно заряженные ядра (ионы) окружены электронами. Эти электроны легко смещаются с орбиты одного из атомов на орбиту другого. Число таких коллективизированных электронов в металлах разное. Этим объясняет различие в электропроводности металлов.

Металлам характерен металлический тип связи, обусловленный электростатическим притяжением между ионами и свободными электронами. Металлы имеют кристаллическое строение. Оно характеризуется закономерным расположением атомов в пространстве и образованием кристаллической решетки.

Типы кристаллических решеток. Кристаллическое строение металлов условно можно представить как упорядоченное расположение атомов в пространстве. Каждый из атомов имеет определенное количество соседей, расположенных на одинаковых расстояниях от него. Представить объёмное строение металлов позволяет *пространственная кристаллическая решетка*, формируемая многократным воспроизведением плоской кристаллической решетки параллельно самой себе (рис. 2.1).

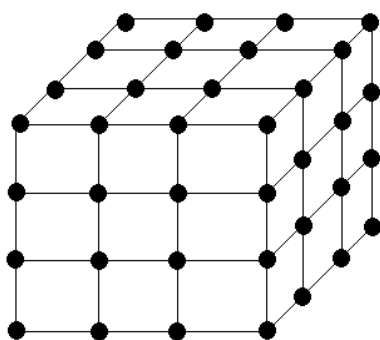


Рис. 2.1. Схема пространственной кристаллической решетки

кристаллическая решетка, формируемая многократным воспроизведением плоской кристаллической решетки параллельно самой себе (рис. 2.1).

Для удобства кристаллическое строение обычно изображают, показывая кружками только центры тяжести атомов и соединяя их прямыми линиями, которые символизируют межатомные связи. Наименьшая часть объема кристаллической решетки, которая определяет её систему, называется *элементарной кристаллической ячейкой*.

Для описания формы и размеров элементарной кристаллической ячейки используют следующие величины: три расстояния от атомов в узлах решетки до их ближайших соседей по осям координат – *параметры решетки* a , b , c и три угла между этими осями – α , β , γ . Кроме того, каждая элементарная кристаллическая ячейка имеет свои характеристики: *координационное число* – число атомов, расположенных на ближайшем одинаковом расстоянии от любого атома и *плотность упаковки* – отношение объема, занятого атомами, к объему ячейки.

Большинству металлов свойственно образование высокосимметричных решеток с плотной упаковкой атомов.

Наиболее распространены следующие типы кристаллической решетки.

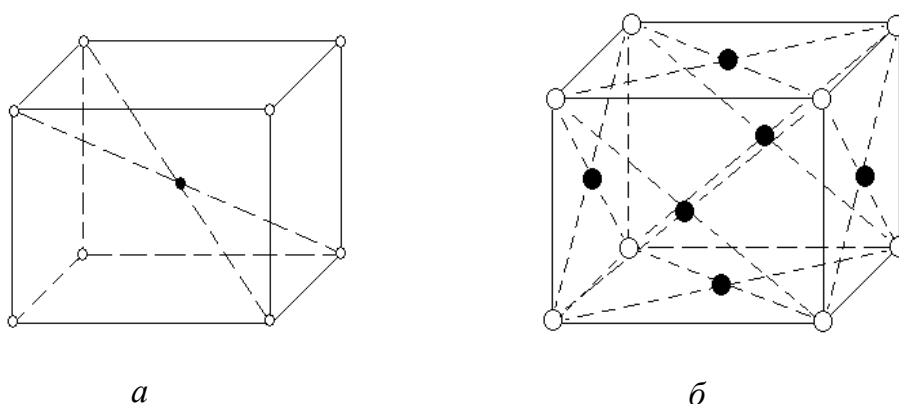


Рис. 2.2. Схема объемно-центрированной кубической (а) и гранецентрированной кубической (б) решетки

Объемно-центрированная кубическая решетка (ОЦК), представляющая собой куб с дополнительным атомом, расположенным в центре. У такой решетки параметр $a = b = c$, угол $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (рис. 2.2а).

Такую решетку имеют Fe, Cr, W, V, Mo и др.

Гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК), также представляющая собой куб с дополнительными атомами, расположенными в центре каждой грани. У такой решетки также параметр $a = b = c$, угол $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (рис. 2.2б).

Такую решетку имеют Fe, Cu, Al, Ni, Au.

Гексагональная плотноупакованная решетка (ГПУ) с шестиугольниками в верхнем и нижнем основании, образуемыми расположенными там атомами и одним атомом в центре каждого шестиугольника. Внутри каждой фигуры расположены три атома (рис. 2.3а).

Такую решетку имеют Zn, Mg, Cd (кадмий) и др.

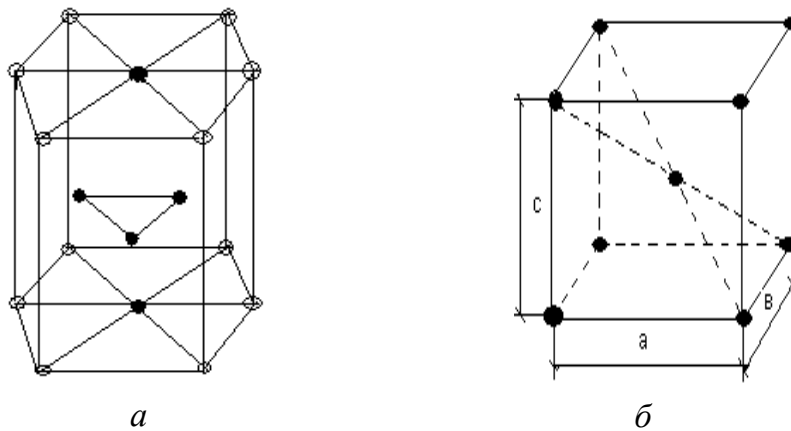


Рис. 2.3. Схема гексагональной плотноупакованной (а) и тетрагональной (б) решетки

Тетрагональная решетка получается при растягивании куба вдоль одной оси. У такой решетки параметр $c > a$, $c > b$, $a = b$. Такая решетка может быть объёмноцентрированной (рис. 2.3б) и гранецентрированной. Подобную решетку имеют индий и радий.

У некоторых металлов кристаллическая решетка может изменяться при изменении температуры. Это явление называется *полиморфизмом* или *аллотропией*. Полиморфизм может вызывать изменение свойств. Он характерен для Fe, Ti, Sn, Zr, C.

Кристаллизация металлов. Процессы плавления и кристаллизации металлов и сплавов происходят в соответствии со II законом термодинамики. Согласно этому закону, все процессы в системе происходят в направлении уменьшения её *свободной энергии*.

Изменение величины свободной энергии в зависимости от температуры для твердого и жидкого состояний приведено на рис. 2.4.

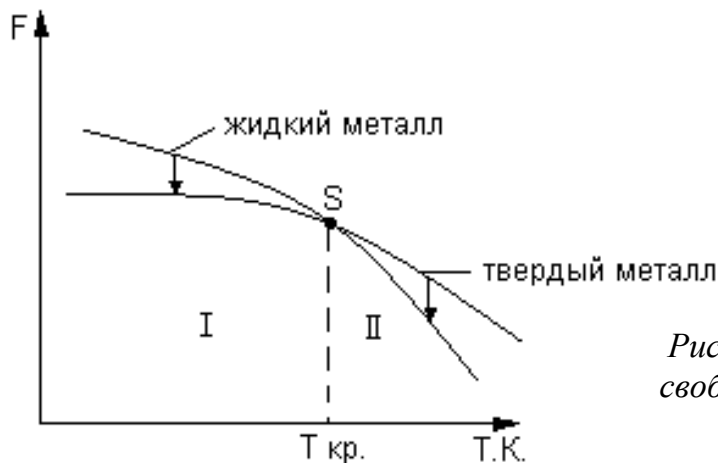


Рис. 2.4. Изменение величины свободной энергии в зависимости от температуры

При температурах ниже $T_{кр}$ (область I) свободная энергия твердого металла меньше свободной энергии жидкого, поэтому протекает *процесс кристаллизации*, и металл затвердевает. При температурах выше $T_{кр}$ (область II) жидкий металл обладает меньшей свободной энергией, поэтому в данной области протекает *процесс плавления*, и металл находится в жидком состоянии.

При нагреве кристаллического тела (металла) наблюдается граница перехода из твердого состояния в жидкое. То же самое наблюдается при охлаждении, то есть при переходе из жидкого состояния в твердое (рис. 2.5).

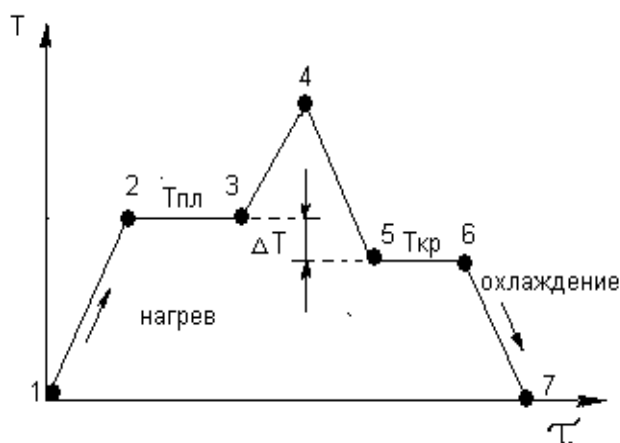


Рис. 2.5. График нагрева и охлаждения металла

На участке 1 – 2 подвод тепла к металлу сопровождается повышением его температуры. За счет поглощения тепловой энергии увеличивается амплитуда колебаний атомов кристаллической решетки.

На участке 2 – 3 подвод тепла не приводит к повышению температуры, а подводимая энергия расходуется на разрушение кристаллической решетки и

перевод атомов в неупорядоченное состояние, то есть переход из твердого состояния в жидкое. На участке 3 – 4 подвод тепла вызывает повышение температуры уже жидкого металла. На участке 4 – 5 идет охлаждение жидкого металла. На участке 5 – 6 происходит кристаллизация металла. При этом выделяется тепло, которое называют *скрытой теплотой кристаллизации*. Кристаллизация металла происходит не при температуре плавления, а при переохлаждении на величину ΔT . Величина ΔT называется *степенью переохлаждения* и является разностью между теоретической температурой плавления (кристаллизации) и фактической температурой кристаллизации.

Механизм кристаллизации металла состоит в том, что при понижении температуры жидкого металла в нем начинают образовываться мелкие кристаллы, называемые центрами кристаллизации (или зародышами). Вокруг этих образовавшихся центров начинают расти кристаллы (рис. 2.6). Процесс кристаллизации металла состоит из 2-х элементар-

ных процессов: 1) зарождение центров кристаллизации; 2) рост кристаллов из этих центров.

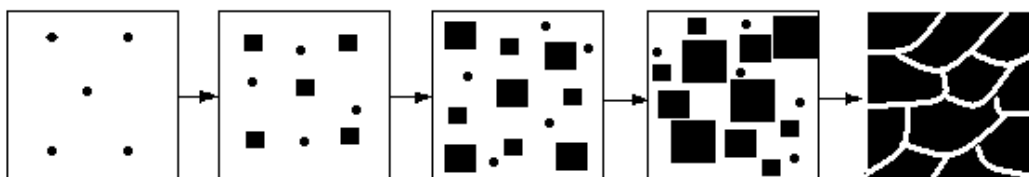


Рис. 2.6. Схема процесса кристаллизации металла

По мере роста кристаллов в жидком металле продолжают возникать новые центры кристаллизации. Растущие из них кристаллы ориентированы произвольно, и при столкновении с соседними правильная форма кристаллов нарушается, становится произвольной. Металл, состоящий из большого количества таких кристаллов, называется *поликристаллическим*.

Строение реальных металлов. Металлы и сплавы, полученные в обычных условиях, состоят из большого количества кристаллов, то есть имеют *поликристаллическое строение*. Эти кристаллы называют *зернами*. Они обычно имеют неправильную форму (рис. 2.7). Каждое из этих зерен имеет свою ориентировку кристаллической решетки, отличающуюся от соседних.

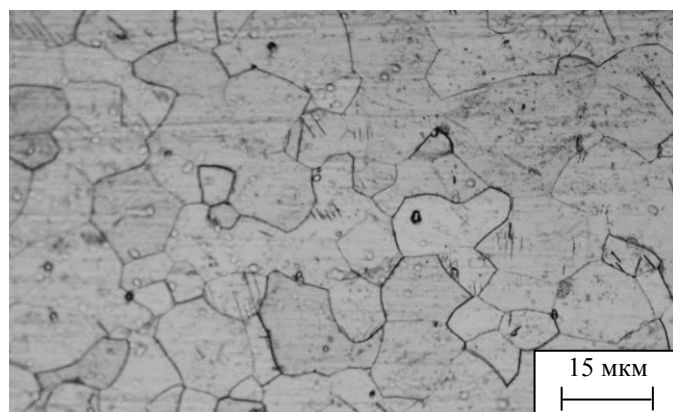


Рис. 2.7. Металлографическое изображение технически чистого титана марки ВТ1-0

Изучение строения металлов с помощью электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа показало, что внутреннее кристаллическое строение зерен не является правильным. В кристаллической решетке металла существуют различные дефекты (несовершенства). Эти

дефекты нарушают связи между атомами и оказывают влияние на свойства металлов.

Различают три вида структурных несовершенств: точечные, линейные и поверхностные. Все эти несовершенства характеризуются малыми – соизмеримыми с межатомным расстоянием – размерами. Точечные дефекты малы в трех измерениях; линейные дефекты малы в двух измерениях, а в одном велики – составляют десятки микрометров; поверхностные дефекты малы в одном измерении, а в двух – велики.

Точечные дефекты кристаллической решетки. Это вакансии, межузельные атомы, примесные атомы (рис. 2.8).

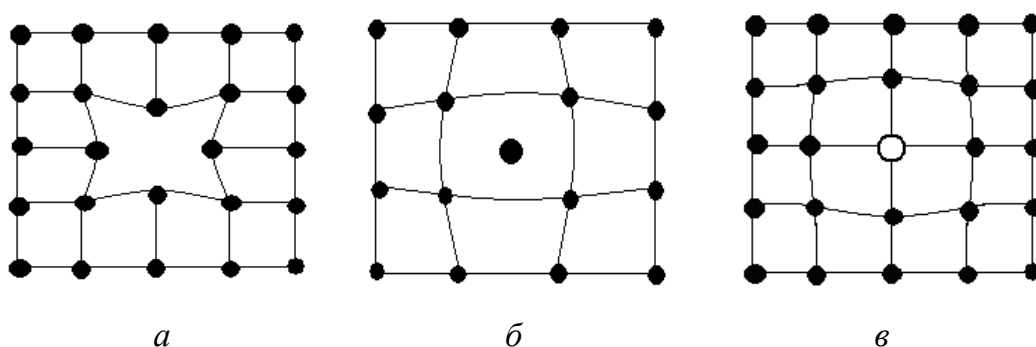


Рис. 2.8. Схемы точечных дефектов кристаллического строения: а – вакансия; б – межузельный атом; в – примесный атом

Вакансия – это отсутствие атома в узле кристаллической решетки (рис. 2.8а). Вокруг вакансии возникает искажение кристаллической решетки и напряжения. Наличие вакансий в решетке сообщает атомам подвижность. При нагреве металла атомы перемещаются в процессе диффузии и самодиффузии (рис. 2.9). Число вакансий зависит от температуры металла. С повышением температуры число вакансий сильно увеличивается. Скопление вакансий может привести к образованию пустот и пор.

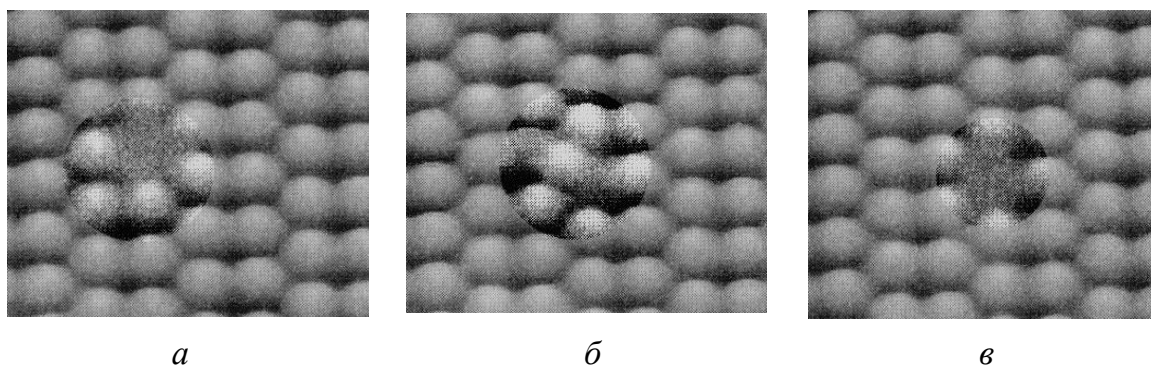


Рис. 2.9. Мигрирование вакансии в кристаллической решетке:

a – первоначальное местоположение вакансии; *б* – смещение атомов;
в – новое местоположение вакансии

Межузельный атом – это атом, вышедший из узла кристаллической решетки и занявший место в междоузлии (рис. 2.8б). Вокруг такого атома также возникает искажение кристаллической решетки. Величина искажений больше, чем при образовании вакансии. Межузельные атомы вызывают упрочнение металла. Вакансии и межузельные атомы могут аннигилировать.

Примесный атом – атом, занимающий в кристаллической решетке металла место основного атома (рис. 2.8в). Примесный атом всегда отличается по размеру от основных атомов.

Линейные дефекты кристаллической решетки. К линейным дефектам относятся дислокации (рис. 2.10).

Дислокация – это особая конфигурация расположения атомов в кристаллической решетке. Дислокации бывают двух основных видов: краевые и винтовые. *Краевую дислокацию* образует лишняя атомная полуплоскость, образованная в части кристалла. Эта полуплоскость называется *экстраплоскостью*.

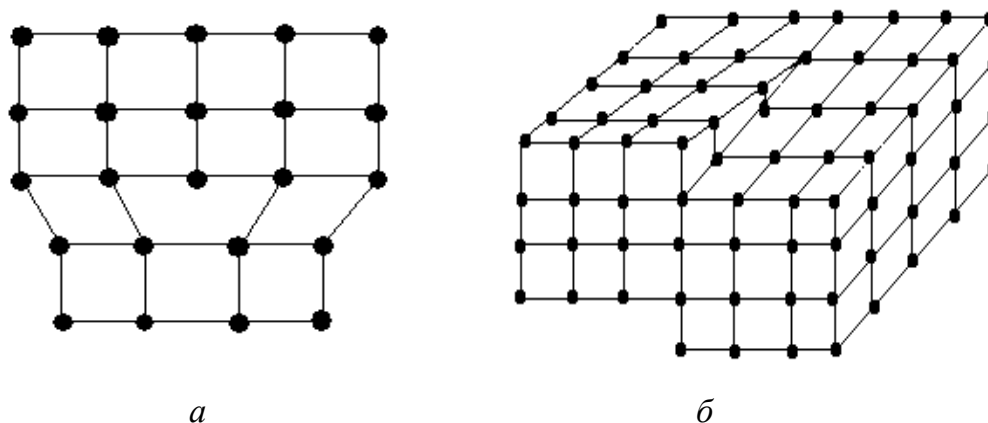


Рис. 2.10. Схемы линейных дефектов кристаллического строения:
a – краевой дислокации; *б* – винтовой дислокации

Винтовая дислокация получается при частичном сдвиге кристаллической решетки. При этом образуется ступенька, проходящая по части кристалла. В металлах могут возникать также *смешанные дислокации*, которые состоят из краевых и винтовых дислокаций.

Образование дислокаций повышает энергию кристалла. Плотность дислокаций зависит от состояния металла. После отжига плотность дислокаций составляет $10^4 - 10^8 \text{ см}^{-2}$. После холодной деформации плотность дислокаций увеличивается с $10^7 - 10^8 \text{ см}^{-2}$ до $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Из-

менение плотности дислокаций сильно влияет на свойства металлов. Повышение плотности дислокаций увеличивает прочность.

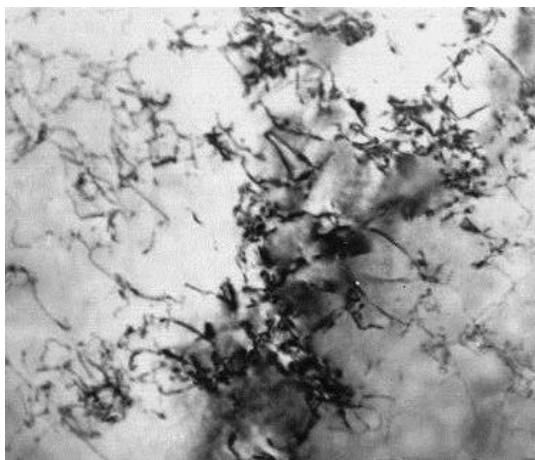


Рис. 2.11. Дислокационная структура в ферритном зерне стали 20

Анализ дислокационной структуры проводят с помощью электронной микроскопии. На рис. 2.11. представлено светлопольное изображение зерна феррита в малоуглеродистой стали. Дислокации наблюдаются в виде нитевидных включений, декорированных атомами легких элементов: углерода, азота, водорода и т.п. Просвечивающая электронная микроскопия позволяет не только увидеть дислокации, но и рассчитать их количество, а так же оценить морфологию.

Поверхностные дефекты кристаллического строения. Эти дефекты имеют малую толщину при значительных размерах в двух измерениях. Примерами поверхностных дефектов являются *границы зерен* и дефекты упаковки.

При поликристаллическом строении зерна в металлах повернуты одно относительно другого, и на границах между ними атомы не имеют правильного расположения (рис. 2.12).

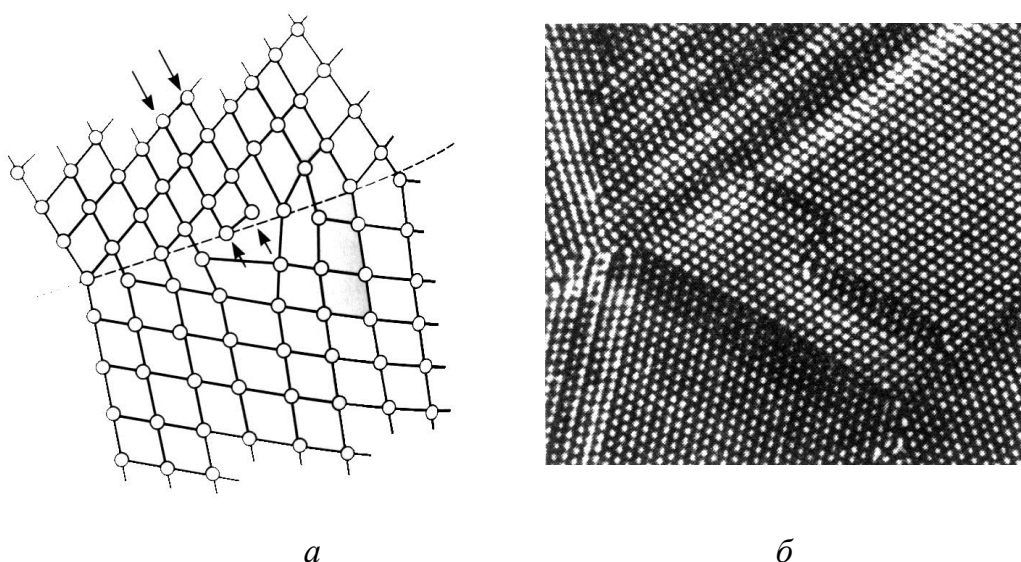


Рис. 2.12. Схема границы между кристаллитами (а) и атомно-силовое изображение границ зерен (б)

Внутри зерен также выявляются нарушения правильного кристаллического строения. Дефекты упаковки возникают при сдвиге, внедрении или удалении плотноупакованной плоскости.

Поверхностные дефекты, так же как точечные и линейные оказывают влияние на механические свойства металлов, упрочняя их.

Объемные дефекты. В металлическом материале встречаются так



Рис. 2.13. Микроструктура газотермического покрытия из сплава на основе никеля ($\times 200$)

называемые объемные дефекты. Они имеют значительные размеры в трех измерениях и образуются в процессе производства металла, либо при изготовлении заготовки или готового изделия. Это *поры, раковины, пустоты, включения шлаков, окислов* и т.д. Так, в газотермических покрытиях, наносимых на детали для их восстановления и упрочнения, объемными дефектами являются границы между напыляемыми частицами, внутренняя пористость, сформировавшаяся при кристаллизации частиц и др. (рис. 2.13). Объемные дефекты снижают прочность металлов.

ровавшаяся при кристаллизации частиц и др. (рис. 2.13). Объемные дефекты снижают прочность металлов.

2.2. Строение металлических сплавов

В технике чистые металлы находят ограниченное применение. Основными конструкционными материалами, которые широко применяются в промышленности, являются металлические сплавы, которые часто обладают более высокими свойствами, чем чистые металлы.

Сплавом называется вещество, полученное сплавлением двух и более элементов. Металлические сплавы получают сплавлением металлов или преимущественно металлов с неметаллами. При этом металлический сплав сохраняет комплекс характерных металлических свойств.

В теории сплавов основными понятиями являются компонент, фаза и система. *Системой* называют металлы и металлические сплавы. *Компонентами* называют вещества, образующие систему. Ими могут быть элементы (металлы и неметаллы) и химические соединения элементов. Например: чистый металл является однокомпонентной системой, сплав двух металлов – двухкомпонентной системой.

Фазой называется однородная часть системы, отделенная от другой части системы (то есть другой фазы) поверхностью раздела. При переходе через эту поверхность раздела сильно (скачком) изменяются химический состав или структура. Например, при кристаллизации чистого металла в системе имеются только две фазы: жидкая – из расплавленного металла; твёрдая – из закристаллизовавшихся зерен этого же металла.

Фазы в металлических сплавах. В твердых в агрегатном состоянии сплавах фазами могут быть: зёрна чистого металла, зёрна твёрдого раствора, зёрна химического соединения.

Твердыми растворами называют фазы, в которых один из компонентов сплава сохраняет свою кристаллическую решетку, а атомы другого компонента располагаются в решетке первого компонента, изменяя ее размеры. Все твердые растворы однофазны и имеют металлический тип связи. Различаются твердые растворы внедрения и твердые растворы замещения (рис. 2.14).

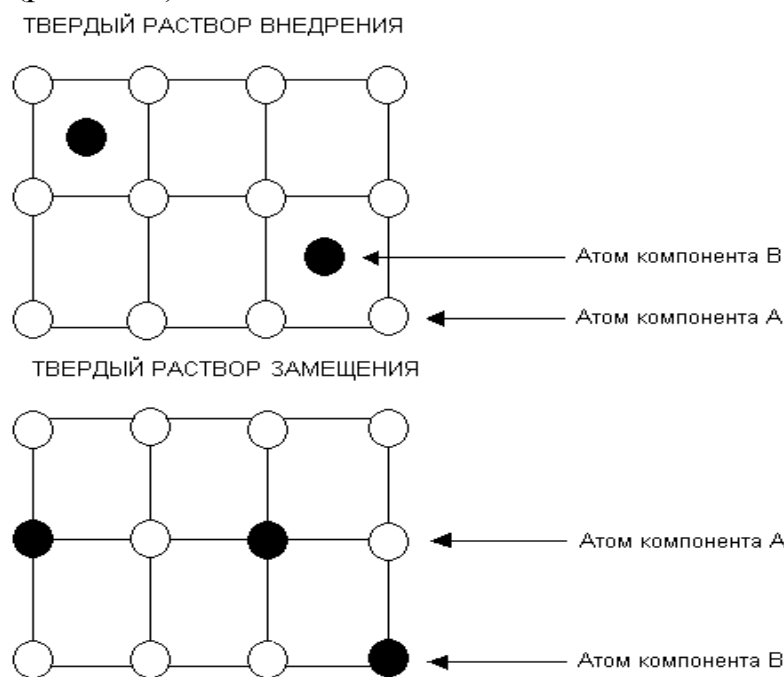


Рис.2.14. Схема формирования твердых растворов

Твердые растворы внедрения возникают при сплавлении металлов с неметаллами, имеющими малый атомный радиус – С, N, В, Н. Такие твердые растворы всегда имеют ограниченную растворимость второго компонента в первом. Например, с углеродом железо образует твердые растворы: феррит с ОЦК-решеткой и аустенит с ГЦК-решеткой.

Твердые растворы замещения образуются, когда атомные радиусы металлов отличаются менее, чем на 15%. Такие твердые растворы могут

быть ограниченными и неограниченными. Чем больше различие в атомных радиусах компонентов, тем меньше растворимость. Неограниченные твердые растворы образуют компоненты, имеющие одинаковый тип кристаллической решетки, например: Cu – Au, Si – Ge, Cu – Ni, Co – Ni, Ti – V.

Химические соединения образуются при химическом взаимодействии компонентов. В химическом соединении элементы находятся в строгом соотношении друг с другом, то есть соблюдается соответствие стехиометрической пропорции, выраженной формулой вида A_mB_n . Химические соединения имеют свою кристаллическую решетку, отличную от решеток компонентов. Химические соединения имеют постоянную температуру плавления, как и чистые металлы, и играют роль самостоятельного компонента.

Свойства химического соединения сильно отличаются от свойств исходных элементов. Как правило, оно обладает высокой твердостью и хрупкостью.

Примерами химических соединений являются:

1. соединения металлов с металлами, так называемые интерметаллиды, например, $CuAl_2$, Ni_3Al , $MoFe_2$, Mg_2Sn .

2. соединения металлов с неметаллами, так называемые металлические соединения, например: карбиды Fe_3C , VC, WC, TiC; нитриды TiN, Cr_2N , Fe_2N ; бориды CrB, Ni_3B , TiB_2 , а также гидриды элементов. Такие соединения очень тугоплавки и обладают высокой твердостью.

Некоторые химические соединения могут формировать твердые растворы. В этом случае сохраняется решетка химического соединения A_mB_n с замещенными в ее узлах атомами А или В, а так же замещенными или внедренными атомами третьего компонента С.

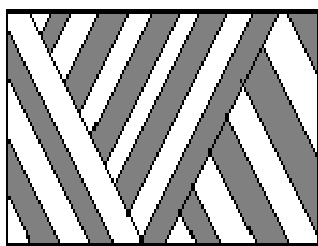


Рис. 2.15. Схема структуры механической смеси

При образовании сплавов в процессе затвердевания или полиморфного превращения в структуре может формироваться особая структурная составляющая, называемая *механической смесью* (рис. 2.15). Механическая смесь не является фазой, это смесь двух фаз, сформированная при определенной постоянной температуре и определенном постоянном химическом составе сплава. Фазами, входящими в механическую смесь, могут быть чистые компоненты, твердые растворы и химические соединения.

Если механическая смесь формируется при одновременной кристаллизации зерен двух фаз из жидкости – она называется *эвтектика*, а

такое превращение называется *эвтектическим*. Если механическая смесь формируется из твердой фазы при ее полиморфном превращении из высокотемпературной модификации в низкотемпературную модификацию с выделением второй фазы – такая механическая смесь называется *эвтектоидом*, а такое превращение называется *эвтектоидным*.

2.3. Диаграммы состояния сплавов

Диаграмма состояния – это графическое изображение состояния сплава в зависимости от температуры и концентрации компонентов. Диаграммы состояния показывают равновесные (устойчивые) состояния, то есть такие, которые обладают минимальной свободой энергий. Диаграмма строится в координатах: температура – концентрация компонентов.

С построения и анализа диаграммы состояния начинается изучение любого сплава. Диаграмма состояния позволяет изучать *фазы и структурные составляющие* сплава. Пользуясь диаграммой состояния можно определять при любой температуре нагрева сплава число составляющих фаз, их состав и количественное соотношение, температуры начала и конца плавления. Используя диаграмму состояния сплава, можно установить возможность проведения термической обработки и её режимы, температуру литья и горячей пластической деформации, и т.д.

Диаграмма состояния строится различными экспериментальными методами: по кривым охлаждения сплава (термический анализ); измерением удлинения образцов при охлаждении; наблюдением микроструктуры; рентгеновским методом и др.

Имеется *4 основных типа диаграмм состояния*, на которых основывается теория сплавов.

Диаграмма состояния сплавов с полной нерастворимостью компонентов в твердом состоянии (механических смесей компонентов). Компоненты таких сплавов в жидком состоянии неограниченно растворимы друг в друге, а в твердом не вступают в химическое взаимодействие друг с другом и не растворяются друг в друге. Такая форма сплава возникает при большом различии в свойствах образующих его металлов. К сплавам с полной нерастворимостью компонентов в твердом состоянии относятся сплавы Al – Si, Pb – Sb, Be – Al, Sn – Zn и др.

На диаграмме (рис. 2.16) линия АДВ является линией *ликвидус*, выше неё сплав находится в жидком состоянии; линия СДЕ является линией *солидус*, ниже неё сплав находится в твердом состоянии и представляет собой механическую смесь компонентов А и В. Выше линии солидус, но ниже линии ликвидус сплав состоит из жидкости (ж) и кри-

сталлов А – левее точки Д; из жидкости (ж) и кристаллов В – правее

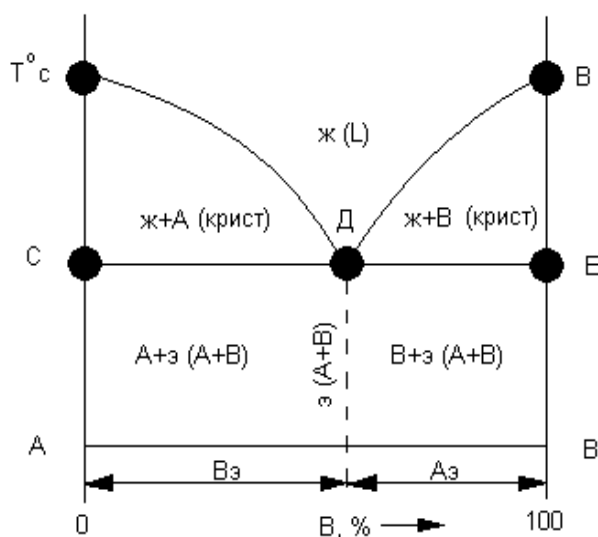


Рис. 2.16. Диаграмма состояния сплавов с полной нерастворимостью компонентов

При концентрации компонентов Аэ и Вэ – в точке Д – на диаграмме происходит кристаллизация из жидкости механической смеси кристаллов А и В – эвтектики. Эвтектика имеет наименьшую температуру плавления (кристаллизации) в данной системе и представляет собой сложную структуру чередующихся фаз А и В.

В соответствии с данной диаграммой в зависимости от концентрации компонентов могут формироваться доэвтектические, эвтектические и заэвтектические сплавы (рис. 2.17).

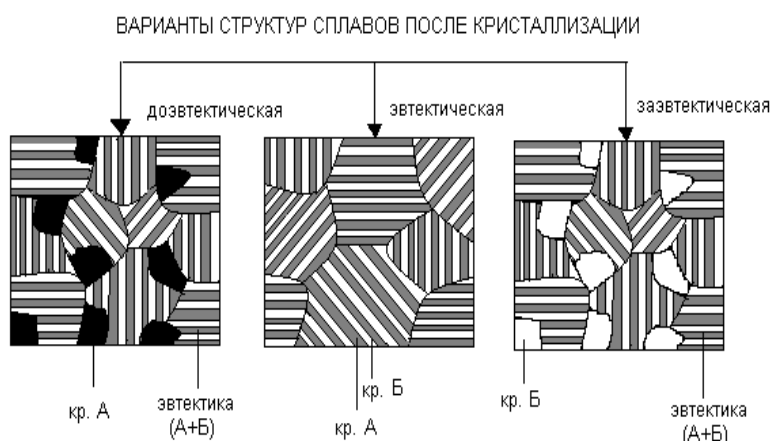


Рис. 2.17. Схематические изображения структуры сплавов с полной нерастворимостью компонентов

Доэвтектические сплавы – левее точки Д, ниже линии СД; заэвтектические – правее точки Д, ниже линии ДЕ; эвтектические – при эвтектической концентрации компонентов А и В, ниже точки Д.

Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Эта диаграмма соответствует сплавам, у которых компоненты и в жидком, и в твердом состоянии образуют растворы. Причем в твердом состоянии формируется твердый раствор замещения с полной растворимостью компонентов. К сплавам, имеющим такую диаграмму, относятся Cu-Ni, Fe-Cr, Co-Cr и др.

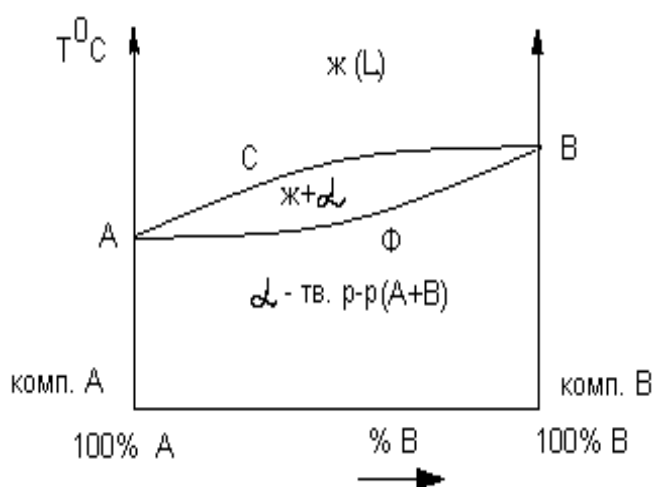


Рис. 2.18. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов

На диаграмме (рис. 2.18): линия ACB – ликвидус; линия AFB – солидус; точки А и В – температуры кристаллизации компонентов А и В, соответственно; α – неограниченный твердый раствор компонентов А и В друг в друге (рис. 2.19).

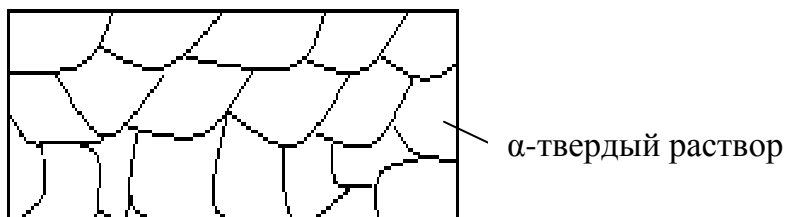


Рис. 2.19. Схематическое изображение структуры сплава с неограниченной растворимостью компонентов при любой концентрации компонентов

При любом составе сплава (кроме состава чистых компонентов), на линии ликвидуса начинается процесс формирования первых кристаллитов твердого состава. На линии солидуса кристаллизация заканчивается.

Кристаллиты твердого раствора, сформированные при разной температуре имеют разный химический состав. При медленной, так называемой равновесной кристаллизации, за счет диффузионных процессов состав кристаллов выравнивается. Однако реальные условия охлаждения сплавов в технологическом производстве изделий не обеспечивают протекание диффузионных процессов. Неравновесная кристаллизация создает внутри сплава так называемую *дендритную (внутрикристаллитную) ликвацию*. Чем больше температурный интервал кристаллизации сплава, то есть, чем больше расстояние между линиями ликвидус и солидус, тем сильнее проявляется дендритная ликвация, снижающая свойства.

Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Эта диаграмма характеризует систему сплавов двух компонентов, обозначающих твёрдые растворы в ограниченных областях сплавов, за пределами которых образуется механическая смесь из кристаллов твёрдых растворов.

Диаграмма представляет собой комбинацию диаграмм: диаграмму с полной нерастворимостью компонентов в твёрдом состоянии (с эвтектикой – механической смесью) и диаграмму с неограниченной растворимостью компонентов в твёрдом состоянии (рис. 2.20).

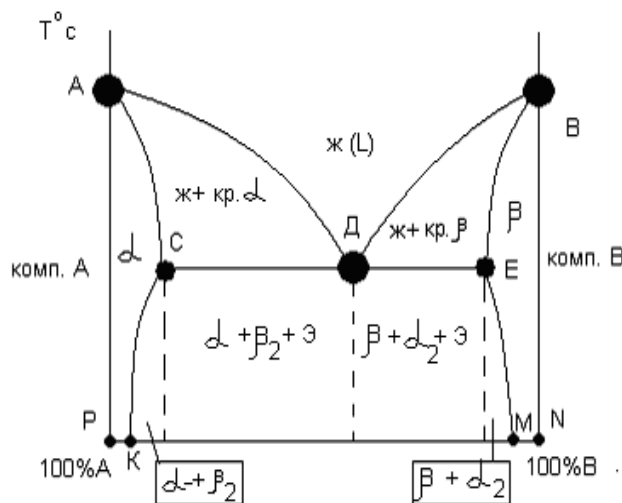


Рис. 2.20. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов

Несмотря на сложный, на первый взгляд, вид, используя закономерности, характерные для двух предыдущих диаграмм, можно легко разобраться в этой диаграмме.

На этой диаграмме: линия АДВ – ликвидус; линия АСДЕВ – солидус; область АСКРА – область существования твердого раствора α

(твёрдого раствора компонента В в кристаллической решетке компонента А); область ВЕМNB – область существования твёрдого раствора β (твёрдого раствора компонента А в кристаллической решетке компонента В); область КСДЕМ – область существования механической смеси двух твёрдых растворов, α и β . Линии КС и ЕМ являются линиями переменной растворимости. Ниже этих линий из твёрдых растворов α и β выделяются вторичные кристаллы β_2 и α_2 .

Физические и химические свойства этих вторичных кристаллов такие же, что и первичных кристаллов той же фазы. Отличие заключается в размерах и форме. При высокой температуре превращения и медленном охлаждении сплава вторичные фазы выделяются по границам зерен твёрдых растворов α и β (рис. 2.21а). При низкой температуре превращения или быстром охлаждении вторичные фазы выделяются внутри зерен твёрдых растворов α и β в виде дисперсных (мелких) включений (рис. 2.21б). Эти вторичные зерна (твёрдого раствора β_2) приводят к упрочнению сплава – так называемому *дисперсионному твердению*.

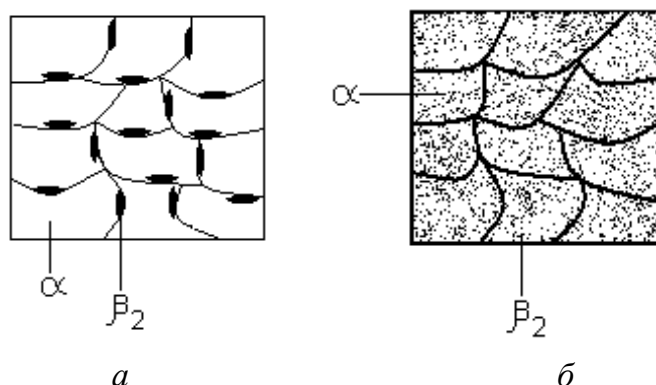


Рис. 2.21. Схематическое изображение выделения вторичных фаз: а – при равновесном охлаждении; б – при неравновесном охлаждении

Чем больше скорость охлаждения, тем меньше образуется вторичных кристаллов β_2 и α_2 фаз. При определенных, выше критических, скоростях охлаждения выделений вторичных фаз вообще не происходит, а происходит закалка сплава и образуется пересыщенный твёрдый раствор α или β .

При охлаждении сплава эвтектического состава (точка Д – на диаграмме) из жидкости одновременно выделяются кристаллы твёрдых растворов α и β , и образуется эвтектика ($\alpha + \beta$), то есть механическая смесь растворов.

При охлаждении доэвтектических сплавов с концентрацией компонента В в пределах между точками С и Д ниже линии солидус (СД)

остатки жидкости (ранее не закристаллизовавшейся как твердый раствор α) кристаллизуются с образованием эвтектики ($\alpha + \beta$). Сплав имеет структуру: эвтектика + отдельные зерна α - фазы (рис. 2.22а).

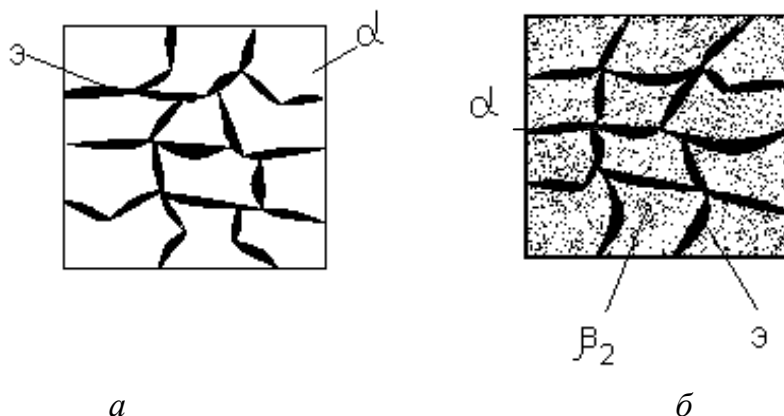


Рис. 2.22. Схематическое изображение строения доэвтектического сплава: а – до начала дисперсионного твердения; б – после дисперсионного твердения

Соотношение зерен эвтектики и твердого раствора α зависит от исходной концентрации сплава. Чем ближе состав сплава к эвтектическому, тем больше зерен эвтектики. Кроме того, при охлаждении сплава из твердого раствора α происходит выделение мелких вторичных зерен β_2 (рис. 2.22б).

При охлаждении заэвтектических сплавов с концентрацией компонента В в пределах между точками D и E происходят аналогичные процессы с выделением α_2 кристаллов.

Указанная диаграмма характерна для сплавов типа Pb – Sn, которые используют в качестве припоев в электронике (из-за низкой температуры плавления ~ 183 °C).

Диаграмма состояния сплавов с устойчивым химическим соединением. Устойчивым называется такое химическое соединение, которое при нагреве до температуры плавления не диссоциирует. Такие химические соединения, как говорилось выше, играют роль компонентов в сплавах и описываются диаграммами состояния с устойчивым химическим соединением (рис. 2.23).

Если химическое соединение $AmBn$ обозначить как компонент С, то данная диаграмма разделится на 2 части, которые аналогичны уже рассмотренным нами ранее. Исключением является то, что одним из компонентов является химическим соединением. Таким образом, одна часть диаграммы (левее точки С) – простая эвтектическая диаграмма с полной нерастворимостью компонентов в твердом состоянии, а другая

(правее точки С) – эвтектическая диаграмма с ограниченной растворимостью компонента С в решетке компонента В, то есть $AmBn$.

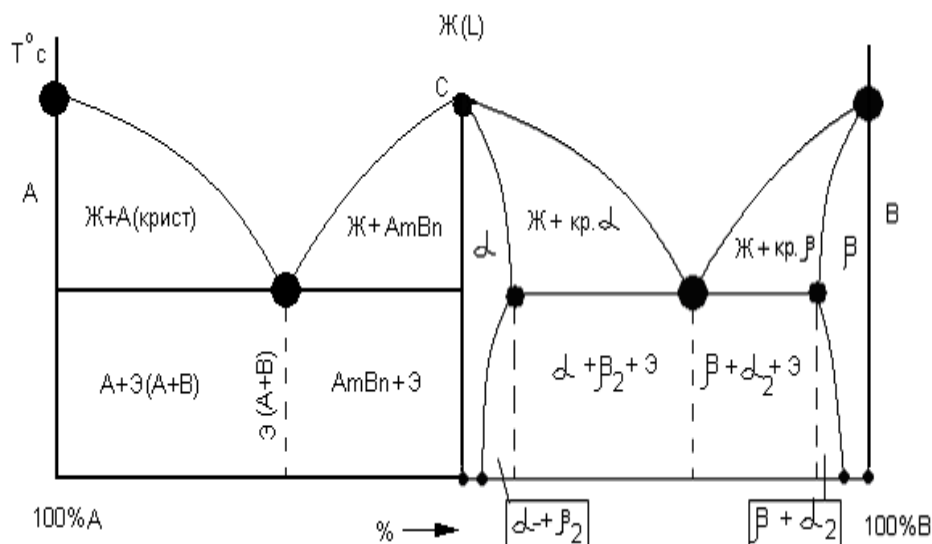


Рис. 2.23. Диаграмма состояния сплавов с устойчивым химическим соединением

Поэтому, по аналогии с диаграммой с ограниченной растворимостью компонентов, α -фаза является твердым раствором компонента В в кристаллической решетке химического соединения $AmBn$, а β -фаза является твердым раствором химического соединения $AmBn$ в кристаллической решетке компонента В.

Физические и механические свойства сплавов. Свойства сплавов в значительной степени определяются фазовым составом, о котором можно судить по диаграмме состояния. Для систем, образующих непрерывные твердые растворы, зависимость свойств от состава изображается кривыми, а для двухфазных смесей – прямыми линиями (рис. 2.24).

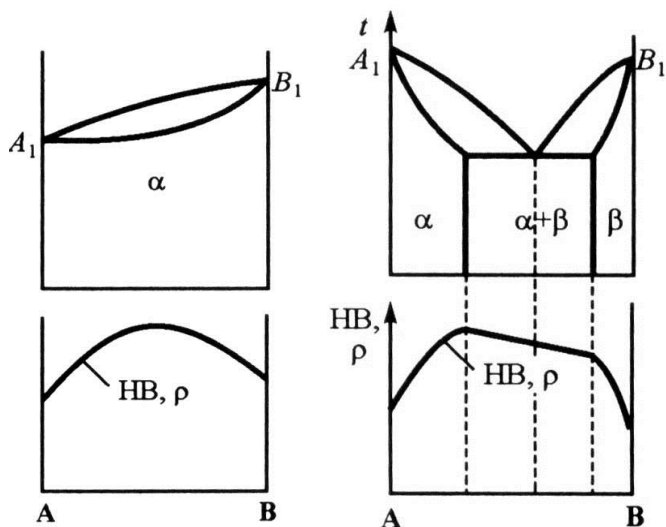


Рис. 2.24. Закономерности изменения свойств сплавов

Эти закономерности указывают на то, что у твердых растворов такие свойства, как твердость $HВ$, удельное сопротивление ρ , всегда превосходят аналогичные свойства исходных компонентов.

Сохранение пластичности твердых сплавов используется на практике. Например, при растворении в меди 5% алюминия прочность увеличивается в два раза, а пластичность остается на уровне пластичности чистой меди. Твердые растворы обладают и другими уникальными физическими и химическими свойствами. Например, при растворении в железе 30% никеля теряются его ферромагнитные свойства.

Строение сплава определяет и технологические свойства. Сплавы в состоянии твердых растворов хорошо обрабатываются давлением (деформируемые сплавы), но трудно – резанием. Эвтектические сплавы обладают наилучшей жидкотекучестью и являются литейными сплавами.

3. ОСНОВНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ

3.1. Железоуглеродистые сплавы

Компоненты и фазы в сплавах железа с углеродом.

Железо (Fe) имеет $T_{пл} = 1539$ °С и две полиморфные модификации: α -железо (Fe_{α}) с ОЦК-решеткой существует при температурах до 911 °С и выше 1392 °С, γ -железо (Fe_{γ}) с ГЦК-решеткой существует в интервале температур 911 – 1392 °С. При температуре 911 °С железо претерпевает *полиморфное* превращение: $Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$. При 768 °С изменяются магнитные свойства железа (точка Кюри): до 768 °С железо ферромагнитно, выше – парамагнитно.

Углерод (С) имеет $T_{пл} = 3500$ °С – неметалл, существует в виде двух кристаллических модификаций: графита со слоистой гексагональной решеткой и алмаза с метастабильной кубической решеткой.

Железо с углеродом образует следующие фазы: твердые растворы внедрения на основе Fe_{α} и Fe_{γ} , а также химическое соединение – Fe_3C .

Феррит (Ф) – твердый раствор углерода в α -железе с предельной растворимостью углерода 0,02 %. Выше 1392 °С существует высокотемпературная модификация феррита. Свойства феррита близки к свойствам железа. Он мягкий – твердость 80 НВ, и пластичный – $\delta = 30$ %.

Аустенит (А) – твердый раствор углерода в γ -железе с предельной растворимостью углерода 2,14 %. Аустенит имеет твердость 200 НВ, пластичность $\delta = 40-50$ %.

Цементит (Ц) – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа Fe_3C) содержит 6,69 % углерода. Имеет ромбическую решетку. Температура плавления 1252 °С. Цементит – метастабильная фаза: при нагреве до 1200 °С разлагается на железо и углерод. Цементит твердый (800 НВ), но не пластичный.

Диаграмма состояния железо – углерод. На диаграмме состояния железо – углерод рассматриваются процессы кристаллизации железоуглеродистых сплавов (стали и чугуна) и превращения в их структурах при медленном охлаждении до комнатной температуры. Диаграмма (рис. 3.1) показывает фазовый состав и структуру сплавов с концентрацией от чистого железа до цементита (6,67 %С).

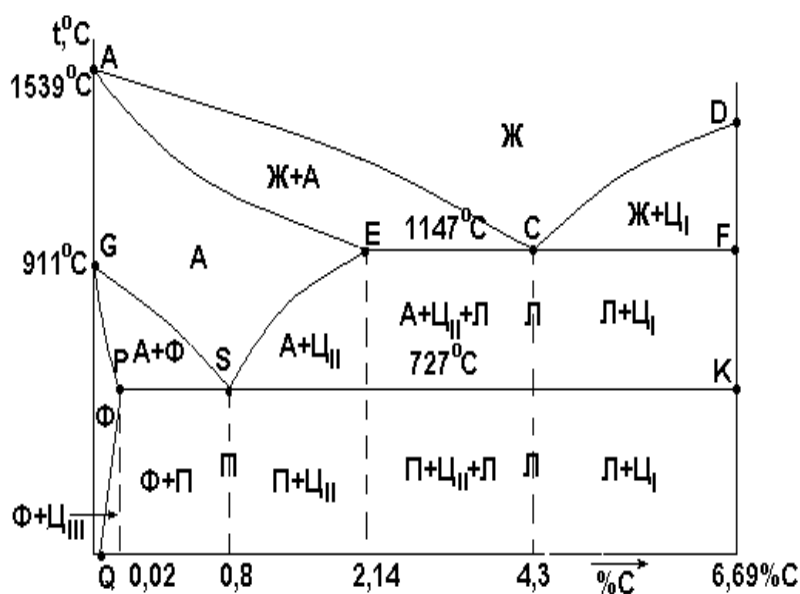


Рис. 3.1. Диаграмма состояния железо-углерод:
 Ж - жидкий раствор;
 А - аустенит;
 Ц - цементит (Fe_3C);
 Ф - феррит;
 П - перлит (эвтектоидная смесь феррита и цементита);
 Л - ледебурит (эвтектическая смесь аустенита и цементита, ниже линии PSK - смесь перлита и цементита)

Затвердевание жидкого сплава начинается при температурах, соответствующих линии ликвидуса ACD. Линия солидуса AECF соответствует температурам конца затвердевания. При температурах, соответствующих линии AC, из жидкого сплава кристаллизуется аустенит, а на линии CD - цементит, называемый первичным цементитом. В точке С при 1147 °С и содержании углерода 4,3 % из жидкого сплава одновременно кристаллизуется аустенит и первичный цементит, образуя эвтектику - *ледебурит*. При температурах, соответствующих линии солидуса AE, сплавы с содержанием углерода до 2,14 % окончательно затвердевают с образованием аустенита. На линии ECF (линия эвтектического превращения) сплавы с содержанием углерода от 2,14 до 6,67 % окончательно затвердевают с образованием эвтектики (ледебурита) и структур, образовавшихся ранее из жидкого состояния, а именно: в интервале 2,14-4,3 % С - аустенита, а в интервале 4,3-6,67 % С - первичного цементита.

При дальнейшем охлаждении сплавов при температурах, соответствующих линиям GSE, PSK и GPQ происходят превращения в твердом состоянии. Превращения в твердом состоянии происходят вследствие полиморфного превращения γ -Fe в α -Fe и в связи с понижением растворимости углерода в аустените и феррите. С понижением температуры избыток углерода выделяется из твердого раствора в виде цементита.

В области диаграммы AGSE находится аустенит. При охлаждении сплавов до температур, соответствующих линии GS, аустенит распадается с выделением феррита. А при температуре ниже линии SE из

аустенита выделяется вторичный цементит. В области диаграммы GSP находится смесь феррита и аустенита. Ниже линии GP существует только феррит. При дальнейшем охлаждении до температур, соответствующих линии PQ, из феррита выделяется цементит (третичный).

В точке S при температуре 727°C и содержании 0,8 % C весь аустенит распадается и превращается в механическую смесь феррита и цементита – *перлит*. В любом сплаве системы при температурах, соответствующих линии PSK (линия эвтектоидного превращения), происходит распад оставшегося аустенита с образованием перлита.

Таким образом, при комнатной температуре все сплавы железа с углеродом состоят только из двух фаз: *феррита* и *цементита*. Кроме того, при концентрации углерода более 0,02 %, во всех сплавах присутствует структурная составляющая *перлит*.

На диаграмме состояния железо–углерод сплавы, находящиеся левее точки E (менее 2,14 % C), называются *сталями*. Сплавы, находящиеся правее точки E (от 2,14 % до 6,67 % C), называются *чугунами*.

Стали, описываемые диаграммой состояния железо-углерод, называются *углеродистыми сталями*. Они содержат до 2 % углерода, а также примеси (Si, Mn, S, P). По структуре в равновесном состоянии они классифицируются на: *доэвтектоидную сталь*, содержащую от 0,02 до 0,8 % C; *эвтектоидную сталь*, содержащую 0,8 % C; *заэвтектоидную сталь*, содержащую более 0,8 % C. Сплав, содержащий до 0,02 % C, называется *техническим железом* (рис. 3.2).

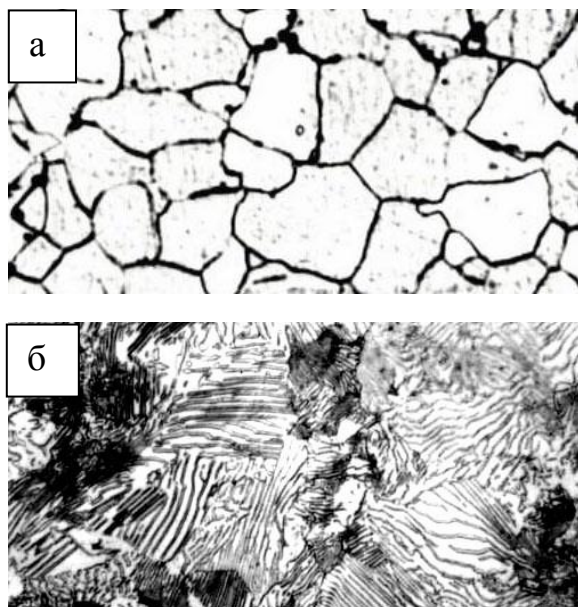


Рис. 3.2. Микроструктура технического железа (а), эвтектоидной стали с пластинчатым перлитом (б) ($\times 400$)

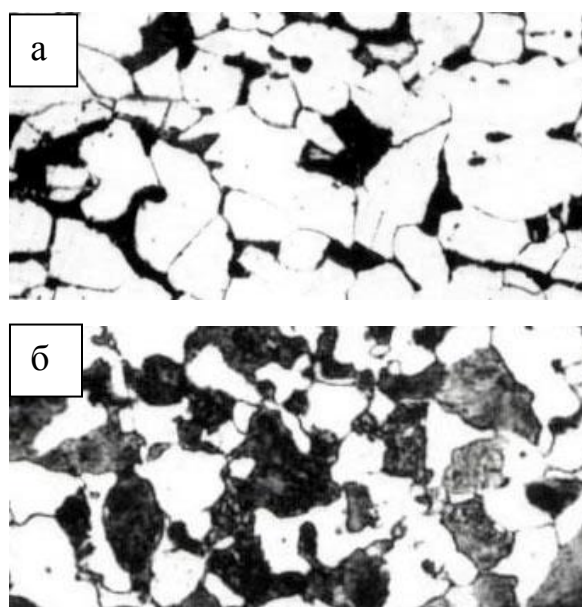


Рис. 3.3. Микроструктура доэвтектоидной стали с содержанием углерода: а – 0,1 %; б – 0,3 % ($\times 250$)

В стали может быть четыре типа структур. Первый тип структуры – феррит и третичный цементит – наблюдается в техническом железе. При рассмотрении в микроскоп феррит наблюдается в виде светлых зерен неодинаковой яркости (рис. 3.2, а). Третичный цементит выделен внутри зерен феррита в виде мельчайших частиц. Второй тип структуры – перлит – наблюдается в эвтектоидной стали. Перлит в большинстве случаев имеет пластинчатое строение (рис. 3.2, б).

Третий тип структуры – феррит и перлит – наблюдается в доэвтектоидных сталях. По мере увеличения концентрации углерода в доэвтектоидной стали, количество зерен феррита убывает, а количество зерен перлита увеличивается (рис. 3.3).

Четвертый тип структуры – вторичный цементит и перлит – наблюдается в заэвтектоидной стали. На шлифе цементит выглядит, как светлая неразрывная сетка, разделяющая пластинчатые участки перлита (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Микроструктура заэвтектоидной стали ($\times 300$)

Чугуны, описываемые диаграммой состояния железо-углерод, называются *белыми чугунами*. Они содержат от 2,14 до 6,67 % углерода, а так же большее, чем в стали, количество примесей (Si, Mn, S, P). Согласно диаграмме, существует три разновидности белых чугунов: *доэвтектический* – 2,14-4,3 % C; *эвтектический* – 4,3 % C; *заэвтектический* – более 4,3 % C.

Доэвтектический чугун имеет структуру перлит, ледебурит и вторичный цементит, эвтектический – ледебурит и заэвтектический – ледебурит и первичный цементит (рис. 3.5).

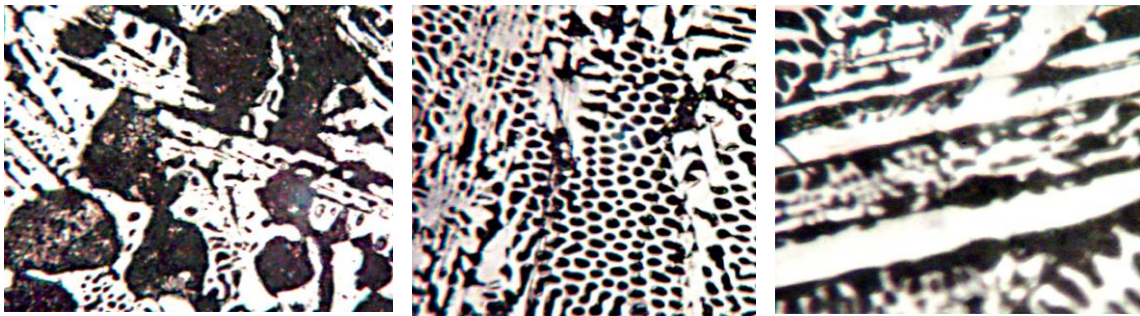


Рис. 3.5. Микроструктура белых чугунов: а – доэвтектического; б – эвтектического; в – заэвтектического ($\times 500$)

Классификация и применение сталей. Стали являются самым востребованным техническим материалом. Это обусловлено очень широким спектром их механических и эксплуатационных свойств, что достигается за счет легирования и *операций внешних воздействий* (термообработка и т.п.).

Стали классифицируются по различным признакам. *По химическому составу* они подразделяются на углеродистые и легированные. *По структуре в равновесном состоянии* углеродистые и легированные стали подразделяются на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные. *По структуре после охлаждения на воздухе* легированные стали подразделяются на перлитные (феррито-перлитные), мартенситные и аустенитные. *По качеству* стали разделяют на стали: обыкновенного качества (массовое содержание вредных примесей – серы и фосфора – не более 0,04 % и 0,05 % соответственно); качественные (не более 0,035 % P и 0,004 % S); высококачественные стали (не более 0,025 % каждой примеси); особо высококачественные стали (не более 0,025 % P и 0,015 % S). Также существуют другие классификации: по способу выплавки, способу разливки и т.д.

Остановимся более подробно на классификации стали *по назначению* – стали общего назначения, конструкционные, инструментальные, специальные.

Стали общего назначения всегда углеродистые обыкновенного качества. Применяются для производства машин, станков, строительных металлоконструкций, предметов широкого потребления. Стали обыкновенного качества обозначают буквами “Ст” и цифрами от 0 до 6, например Ст.2кп., Ст.3кп, Ст.3пс. Буквы “Ст” обозначают “сталь”, цифры от 0 до 6 – условный номер марки стали в зависимости от химического состава. Индексами указывается степень раскисления: кп – кипящая, пс – полуспокойная, сп – спокойная.

Конструкционные стали применяются для изготовления деталей машин и механизмов (зубчатые колеса, штоки, валы, маховики и т.д.). В основном, это качественные углеродистые и низколегированные стали. Конструкционные качественные углеродистые стали маркируются двухзначным числом, указывающим содержание углерода в сотых долях процента. Например: сталь 20 (0,2 % С), сталь 45 (0,45 % С), сталь 60 (0,6 % С). В легированных конструкционных сталях, легирующие элементы в марке стали указывается буквой и последующей цифрой, обозначающей примерное содержание данного легирующего элемента в процентах. Легирующие элементы имеют условные обозначения буквами русского алфавита (Х – хром, Н – никель, М – молибден, В – вольфрам, К – кобальт, Т – титан, А – азот, Г – марганец, Д – медь, Ф – ванадий, С – кремний, П – фосфор, Р – бор, Б – ниобий, Ц – цирконий, Ю – алюминий). Например: сталь 40Х (0,4 % С; ~ 1 % Cr), сталь 20Г (0,2 % С; ~ 1 % Mn), сталь 30ХНМА (0,3 % С; ~ 1 % Cr; ~ 1 % Ni; ~ 1 % Mo; А в конце марки обозначает сталь высокого качества).

Инструментальные стали используют для производства режущего, измерительного и штампового инструмента. Инструментальные стали всегда качественные и высококачественные. Они могут быть как углеродистыми, так и легированными. Инструментальные качественные углеродистые стали маркируются буквой У (углеродистая инструментальная сталь) и числом, указывающим содержание углерода в десятых долях процента. Например: сталь У8 (0,8 % С), сталь У13 (1,3 % С). Низколегированные инструментальные стали маркируются так же, как конструкционные, но содержание углерода дается в десятых долях процента. Если первая цифра в марке отсутствует, то содержание углерода превышает 1 %. Это стали 9ХС, ХВГ, ХВ5. Быстрорежущие стали маркируются буквой Р. Последующее число показывает содержание вольфрама в процентах. Так как содержание в быстрорежущих сталях углерода ~ 1 %, а хрома ~ 4 %, они не указываются в марке. Остальные элементы обозначаются как во всех легированных сталях. Например: стали Р18, Р6М5, Р6М5Ф2К8.

К специальным сталям относятся стали, разработанные для особых условий эксплуатации: при повышенной и пониженной температуре, в агрессивной среде. Это всегда высококачественные и особо высококачественные высоколегированные стали. К ним относятся жаростойкие и жаропрочные стали, нержавеющие и кислотостойкие стали, криогенные стали и многие другие.

Классификация и применение чугунов. Как описывалось выше, чугун – это железоуглеродистый сплав с содержанием углерода >2,14 %. Кроме того, в чугуне содержатся примеси: кремний, марганец,

сера, фосфор и др. С целью улучшения свойств в чугуны могут вводиться легирующие элементы, такие как хром, никель, медь и др.

Чугун, по сравнению со сталью, имеет как преимущества, так и недостатки. Положительными свойствами этого материала являются: хорошие литейные свойства, хорошая обрабатываемость резанием, достаточно высокая работоспособность в условиях трения, способность гасить вибрации, небольшая стоимость. Недостатком чугуна являются его низкие пластические свойства и ударная вязкость, что препятствует использованию чугуна для изготовления деталей, работающих при значительных динамических, ударных нагрузках, и делает невозможным в большинстве случаев использование обработки давлением для изготовления чугунных изделий.

По структуре различают чугуны, в которых углерод находится в виде химического соединения с железом Fe_3C – цементита, и чугуны, в которых углерод, в основном, находится в свободном состоянии, в виде графита. Первая разновидность чугуна называется *белым чугуном* (его строение описано выше).

Получают белый чугун при ускоренном охлаждении в процессе отливки деталей, заготовок. Способствует также получению этой разновидности чугуна повышенное содержание в нем хрома, марганца. Структура белого чугуна определяет его механические свойства: это твердый хрупкий материал. Вследствие низкой пластичности, белый чугун применяется очень редко, в основном, для изделий, работающих в условиях абразивного и гидроабразивного износа, когда его повышенная хрупкость не играет решающей роли.

В ряде случаев изготавливают детали с так называемой отбеленной поверхностью. Их поверхностный слой представляет собой белый чугун и имеет повышенную твердость и износостойкость, а сердцевина имеет структуру другой разновидности чугуна (с наличием графита), что обеспечивает необходимый комплекс механических свойств. Примерами таких изделий с отбеленной поверхностью являются валки холодной прокатки, шары шаровых мельниц.

Чугуны, в которых углерод находится в свободном виде, классифицируют по форме графитовых включений: *серый чугун* – в нем содержится графит в виде пластинчатых включений; *ковкий чугун* с хлопьевидными включениями графита; *высокопрочный чугун* в котором графит имеет шаровидную форму. Металлическая основа этих чугунов может быть перлитной, ферритной или феррито-перлитной (рис.3.6).

Графитовые включения в чугуне снижают его механические свойства, особенно пластичность. Чем менее разветвленную форму они имеют, тем меньше их отрицательное влияние. Это связано с тем, что

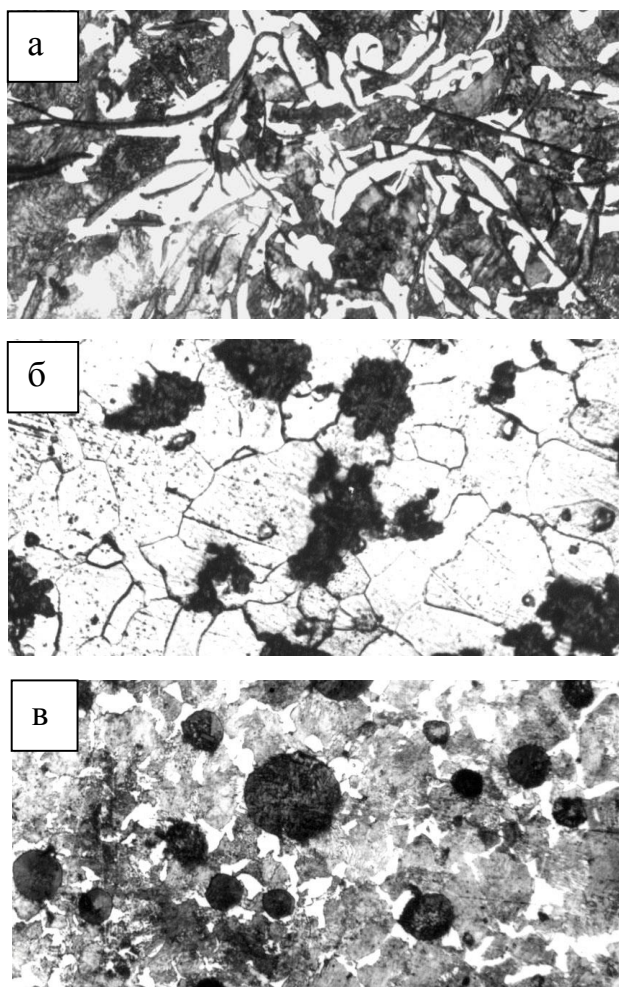


Рис. 3.6. Структура чугунов: а – серый чугун с феррито-перлитной основой;
 б – ковкий чугун с ферритной основой;
 в – высокопрочный чугун с феррито-перлитной основой ($\times 300$)

графитовые включения, играя роль трещин и пустот в чугуне, являются концентраторами напряжений. Чем компактнее форма включений, тем ниже концентрация напряжений и тем меньше снижение механических свойств металла за счет графита.

Серый чугун получают при медленном охлаждении металла при литье изделий, а также при повышенном содержании кремния, углерода. Обозначается он буквами СЧ, после которых ставится цифра, показывающая предел прочности при растяжении σ_b в кг/мм^2 . Например, СЧ12 ($\sigma_b = 12 \text{ кг/мм}^2$). Применяется серый чугун для изготовления слабонагруженных деталей, работающих в легких условиях. Например, корпуса редукторов, насосов, электродвигателей, различные

крышки, отопительные батареи и т.п.

Ковкий чугун получают из белого чугуна путем специального отжига. Это длительная термическая обработка, при которой белый чугун медленно нагревается до температур $950\text{-}1000 \text{ }^\circ\text{C}$ и после определенной выдержки медленно охлаждается. При таком отжиге происходит графитизация цементита белого чугуна с образованием хлопьевидных включений графита. Обозначается ковкий чугун буквами КЧ, после которых следуют цифры, показывающие предел прочности при растяжении σ_b в кг/мм^2 – первая цифра, и относительное удлинение δ в % – вторая цифра. Например, КЧ 30-6 ($\sigma_b = 30 \text{ кг/мм}^2$, $\delta = 6 \%$). Применяется этот чугун для изготовления деталей, работающих в более тяжелых условиях по

сравнению с деталями из серого чугуна, - при повышенных нагрузках, при знакопеременных и небольших ударных нагрузках. Например, картеры редукторов, коробок передач автомобилей, кронштейны рессор, различные крюки, фланцы и т.п.

Высокопрочный чугун получают путем модифицирования его при выплавке магнием или церием в количестве 0,05 %. Модификаторы способствуют формированию шаровидных включений графита. Обозначаются высокопрочные чугуны буквами ВЧ и цифрой, показывающей предел прочности при растяжении σ_B . Например, ВЧ 40 ($\sigma_B = 40 \text{ кг/мм}^2$). Применяется высокопрочный чугун для изготовления ответственных деталей, работающих в довольно сложных условиях при повышенном нагружении. Например, коленчатые и распределительные валы легковых автомобилей, прокатные валки, корпуса турбин, детали кузнечно-прессового оборудования и др.

Представляет интерес использование чугунов для деталей, работающих в специфических условиях (агрессивные среды, высокие температуры и др.). Для этого в чугуны вводят легирующие элементы, способствующие повышению необходимых свойств. Такие чугуны называют *легированными* или *чугунами специального назначения*. Они дешевле легированных сталей и, вследствие лучших литейных свойств, оказываются предпочтительнее для получения отливок.

3.2. Цветные сплавы

Наиболее широко применяемыми цветными металлами являются медь, алюминий, магний, титан, олово, свинец, никель. Мировое производство цветных металлов, в том числе и редких (тантала, германия, ниобия и др.), непрерывно возрастает. Эти металлы обладают особо ценными свойствами и поэтому, несмотря на относительно высокую стоимость, их широко используют в промышленности. Особенно перспективны материалы, которые дают возможность снизить массу конструкций при повышении их прочности и жесткости. Высокая коррозионная стойкость цветных металлов обусловлена образованием на поверхности металла пленки оксида. Эта пленка обладает хорошим сцеплением с металлом благодаря близости их удельных объемов и предохраняет металл от дальнейшей коррозии.

Цветные металлы применяются в электротехнической промышленности, авиации, радиоэлектронной промышленности. В качестве конструкционных материалов цветные металлы применяются, главным образом, в виде сплавов. В тех случаях, когда это возможно, цветные металлы

заменяют черными или неметаллическими материалами – пластмассой, керамикой и т. д.

Алюминий и его сплавы. Одним из наиболее легких конструкционных материалов является *алюминий*. Его плотность $2,7 \text{ г/см}^3$, температура плавления $658 \text{ }^\circ\text{C}$. Алюминий имеет кубическую гранцентрированную решетку без полиморфных превращений. В отожженном состоянии алюминий обладает малой прочностью ($\sigma_b = 80\text{-}120 \text{ МПа}$) и твердостью (25 НВ), но большой пластичностью ($\delta = 35\text{-}45 \%$). Отличается высокой коррозионной стойкостью в пресной воде и атмосфере.

Алюминий получают из руд, содержащих оксиды алюминия. Маркируется алюминий буквой А и числом, зависящем от количества примесей. Например, А999, А995, А97, А95, А85, А5.

Благодаря высокой пластичности и электропроводности алюминий широко применяют в электротехнической промышленности для изготовления проводов, кабелей; в авиационной промышленности – труб, маслопроводов и бензопроводов; в легкой и пищевой промышленности – фольги, посуды. Алюминий используют как раскислитель при производстве стали. Ввиду низкой прочности и незначительной упрочняемости при пластической деформации в холодном состоянии технически чистый алюминий как конструкционный материал применяют сравнительно редко.

В результате сплавления алюминия с магнием, медью, цинком и другими металлами получены сплавы с достаточно высокой прочностью, малой плотностью и хорошими технологическими свойствами. Различают литейные и деформируемые алюминиевые сплавы.

Литейные сплавы алюминия маркируются буквами АК и числом, показывающим условный номер сплава. Чтобы сплав обладал хорошими литейными свойствами, он должен иметь узкий температурный интервал кристаллизации. Кроме того, желательно, чтобы он имел низкую температуру плавления. Этим требованиям удовлетворяют эвтектические сплавы. Наибольшее распространение получили сплавы алюминия с кремнием, образующие эвтектику при содержании 11,6 % кремния. Эти сплавы называются *силуминами*.

Широко применяется силумин эвтектического состава АК12, содержащий 10-12 % кремния и модифицированный добавками малого количества натрия 0,5-0,8 % (рис. 3.7а).

Модифицированный силумин имеет очень хорошие литейные свойства, но малую прочность ($\sigma_b = 180 \text{ МПа}$). Термической обработкой этот силумин не упрочняется. Уменьшение содержания кремния и добавка небольшого количества магния и марганца (АК9) ухудшает литейные свойства силуминов, но улучшает механические. Эти сплавы яв-

ляются дисперсионно твердеющими и упрочняются закалкой и старением (рис. 3.7б).

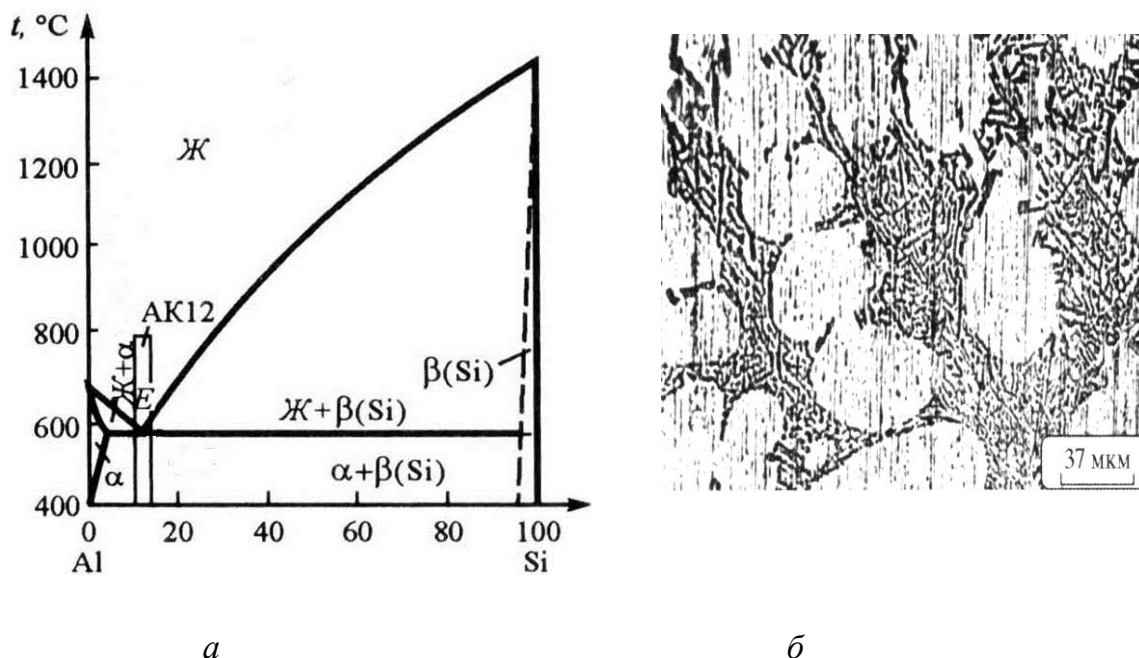


Рис. 3.7. Диаграмма состояния системы Al–Si (а) и микроструктура силумина ($\times 400$) (б).

Кроме силуминов, используются литейные сплавы алюминия с медью (АМ5) и магнием (АМг10). Они обладают значительно большей прочностью, чем силумины, но их литейные свойства хуже.

Деформируемые сплавы алюминия применяются для изготовления проволоки, фасонных профилей и различных деталей, получаемых ковкой, штамповкой или прессованием. Эти сплавы делят на упрочняемые и не упрочняемые термообработкой.

К неупрочняемым относят сплавы алюминия с марганцем и магнием. Они обладают высокой коррозионной стойкостью, умеренной прочностью, высокой пластичностью, хорошо свариваются. Их применяют для изделий, эксплуатируемых в агрессивной среде, а также изготавливаемых путем глубокой штамповки: рам и кузовов, перегородок зданий, переборок судов, бензиновых баков и т. п.

Деформируемые сплавы, упрочняемые термообработкой, имеют наибольшую плотность (3 г/см^3) и высокую прочность ($\sigma_{\text{в}}$ до 700 МПа). Их применяют для изготовления ответственных деталей. Наиболее распространенным сплавом этой группы является *дуралюмин*. Дуралюмин

маркируют буквой Д и порядковым номером: Д1, Д16, Д18. Основным компонентом, упрочняющим дуралюмин, является медь (до 5 %), в качестве дополнительных легирующих элементов используют магний (до 1 %), марганец (до 2 %), титан и др. Медь и магний способствуют дисперсионному твердению сплава при термообработке за счет выделения дисперсных частиц CuAl_2 и Al_3Mg_2 . Марганец усиливает упрочнение и повышает коррозионную стойкость.

Термообработка дуралюмина заключается в закалке и старении. В результате термической обработки прочность дуралюмина повышается в два раза (для дуралюмина Д1 с 200-240 МПа до 450-500 МПа), а пластичность практически не меняется.

Достоинством дуралюмина является высокая удельная прочность (отношение предела прочности к плотности), что особенно важно в самолетостроении. Например, из сплава марки Д16 делают обшивку и лонжероны самолетов, кузова автомашин и т. д.

Титан и его сплавы. Титан – металл серебристо-белого цвета, плотностью $4,5 \text{ г/см}^3$ и температурой плавления $1670 \text{ }^\circ\text{C}$. Ниже температуры $882 \text{ }^\circ\text{C}$ существует α -титан, имеющий гексагональную плотноупакованную решетку. При $882 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит полиморфное превращение, и выше этой температуры существует β -титан, имеющий объемноцентрированную кубическую кристаллическую решетку.

Главное преимущество титана и его сплавов состоит в сочетании высоких механических свойств с коррозионной стойкостью в агрессивных средах (в азотной, соляной и фтористой кислотах) и относительно низкой плотностью. Прочность титана $\sigma_{\text{в}} - 300-500 \text{ МПа}$, относительное удлинение $\delta = 20-30 \text{ \%}$. Чем больше в титане примесей, тем он прочнее и менее пластичен. Технически чистый титан марок ВТ1-00 содержит не более 0,4 % примесей, ВТ1-0 не более 0,55 % примесей. Высокая коррозионная стойкость титана достигается за счет образования на его поверхности плотной оксидной пленки. Главные недостатки титана – высокая стоимость, низкая износостойкость, склонность к взаимодействию с газами при температурах выше $500-600 \text{ }^\circ\text{C}$. Технический титан хорошо обрабатывается давлением, сваривается (в среде аргона), но обработка его резанием затруднена.

Главная цель легирования титана – повышение механических свойств. Такие легирующие элементы, как Al, Fe, Mn, Cr, Sn, V, повышают прочность титана (рис. 3.8), несколько снижая при этом пластичность и вязкость. Al, Zr, Mo, Sn увеличивают жаропрочность. Mo, Zr, Nb, Ta повышают коррозионную стойкость.

По влиянию на температуру полиморфного превращения все легирующие элементы в титановых сплавах делятся на α -стабилизаторы, β -

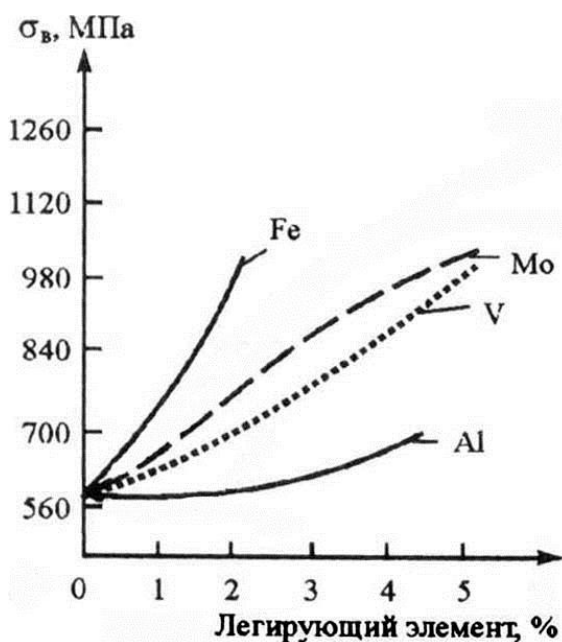


Рис. 3.8. Зависимость предела прочности титанового сплава от содержания основных легирующих элементов.

стабилизаторы и нейтральные. К α -стабилизаторам, повышающим температуру полиморфного превращения, относятся алюминий, кислород и водород. В качестве легирующего элемента используется только алюминий. β -стабилизаторы (Mo, V, Mn, Fe, Cr и др.) снижают температуру полиморфного превращения и расширяют область существования β -титана. Нейтральные легирующие элементы (Sn, Zr) почти не влияют на температуру полиморфного превращения.

По структуре после отжига титановые сплавы делятся на α -сплавы, псевдо- α -сплавы, $(\alpha+\beta)$ -сплавы, псевдо- β -сплавы и β -сплавы. Псевдо- α -сплавы содержат очень небольшое количество (до 5 %) β -фазы, а псевдо- β -сплавы очень небольшое количество α -фазы. Двухфазные $(\alpha+\beta)$ -сплавы и псевдо- β -сплавы способны к упрочению путем закалки и искусственного старения. После закалки, в зависимости от содержания β -стабилизаторов, может образоваться мартенсит (пересыщенная α -фаза) и неустойчивая β -фаза. Мартенсит в титановых сплавах не обладает повышенной прочностью по сравнению с равновесной α -фазой.

Упрочение происходит при искусственном старении за счет выделения мелкодисперсных частиц α -фазы при распаде мартенсита β -фазы. В зависимости от химического состава закалка производится от 700-900 °С, а старение – при 420-600 °С.

По технологическому признаку титановые сплавы классифицируются на деформируемые, литейные и порошковые. По свойствам титановые сплавы делятся на высокопластичные, сплавы нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные, коррозионностойкие.

Деформируемые сплавы. К α -сплавам относятся технический титан ВТ1-00 и ВТ1-0, сплавы марок ВТ5 (5 % Al) и ВТ5-1 (5% Al и 2,5 % Sn) и др. Эти сплавы не упрочняются термической обработкой и применяются в отожженном состоянии (рис. 3.9). Они характеризуются хорошей свариваемостью, высокими механическими свойствами при криогенных температурах.

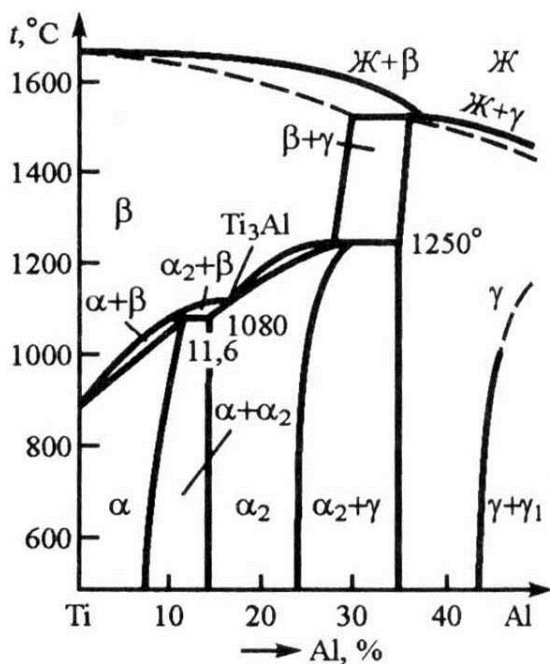


Рис. 3.9. Диаграмма состояния системы Ti-Al

ВТ14 (4,5 % Al, 3 % Mo, 1 % V), ВТ16 (2,5 % Al, 5 % Mo, 5 % V), жаропрочные сплавы ВТЗ-1 (6 % Al, 2,5 % Mo, 2 % Cr, 0,3 % Si, 0,5 % Fe), ВТ8, ВТ9 и др. Эти сплавы упрочняются закалкой и старением (рис. 3.10). При этом чем больше содержание β-фазы, тем сильнее выражен упрочняющий эффект.



Рис. 3.10. Микроструктура титанового сплава ВТ6 после закалки ($\times 400$)

Псевдо-β-сплавы содержат небольшое количество α-стабилизатора и большое количество β-стабилизаторов (до 20 %). Они подвергаются закалке и старению, после чего их прочность доходит до $\sigma_B = 1300-1700$ МПа, что является наибольшим значением для титановых сплавов. Наибольшее распространением из этой группы получил сплав ВТ15 (3 % Al, 7 % Mo, 11 % Cr).

Псевдо-α-сплавы сохраняют достоинства α-сплавов, но за счет наличия небольшого количества β-фазы имеют более высокую пластичность. Поэтому они хорошо обрабатываются давлением как в горячем, так и в холодном состоянии. Кроме алюминия, псевдо-α-сплавы легируются небольшим количеством β-стабилизаторов. К этим сплавам относятся ОТ4 (3,5 % Al, 1,5 % Mn), ОТ4-1 (1,5 % Al, 1 % Mn), ВТ4 (5 % Al, 1,5 % Mn).

Двухфазные (α+β)-сплавы легируются одновременно алюминием и β-стабилизаторами. К ним относятся высокопрочные сплавы марок ВТ6 (6 % Al, 4,5 % V),

Однофазные β -сплавы большого применения не получили, так как для получения β -структуры требуется вводить очень большое количество дорогих β -стабилизаторов. Например, сплав марки 4201, содержит 33 % молибдена. Он характеризуется исключительной коррозионной стойкостью и может заменить тантал, сплавы на никелевой основе, благородные металлы.

Литейные сплавы титана по составу аналогичны деформируемым. В конце марки они имеют букву Л. По структуре они относятся к α -сплавам (BT1Л, BT5Л) или ($\alpha+\beta$)-сплавам с небольшим количеством β -фазы (BT3-1Л, BT14Л). Литейные титановые сплавы имеют меньшую прочность и пластичность, чем деформируемые. Упрочняющая термическая обработка для них не применяется, так как при этом резко снижается пластичность.

Область применения титановых сплавов очень велика: в авиации (обшивка самолетов, диски, лопатки компрессоров и т. д.); в ракетной технике (корпуса двигателей, баллоны для сжатых и сжиженных газов); в химическом машиностроении (оборудование, находящееся в среде хлора и его растворов, детали, работающие в азотной кислоте, теплообменники); в судостроении (обшивка морских судов, поэтому эти суда не требуют окраски); в энергомашиностроении (диски, лопатки стационарных турбин); в криогенной технике. В автомобильной отрасли применяемые титановые сплавы позволяют уменьшить массу автомобильных и дизельных двигателей, увеличить их частоту вращения и мощность.

Медь и ее сплавы. Чистая медь имеет розовато-красный цвет, плотность ее $8,93 \text{ г/см}^3$, температура плавления $1083 \text{ }^\circ\text{C}$. В отожженном состоянии $\sigma_{\text{в}} = 250 \text{ МПа}$, $\delta = 45\text{-}60 \%$, твердость 60 НВ. Кристаллизуется в кубической гранцентрированной решетке и полиморфных превращений не имеет. Благодаря высокой электропроводности около половины всей произведенной меди используют в электро- и радиотехнической промышленности для изготовления проводников, монтажных и обмоточных проводов, токопроводящих деталей приборов, аппаратов, в электровакуумной технике. Как конструкционный материал медь не используется из-за высокой стоимости и низких механических свойств. Маркируется буквой М и цифрами, зависящими от содержания примесей. Медь марок М00 (0,01 % примесей), М0 (0,05 %) и М1 (0,1 %) используется для изготовления проводников электрического тока, медь М2 (0,3 %) – для производства высококачественных сплавов меди, М3 (0,5 %) – для сплавов обыкновенного качества. Широкое использование в промышленности имеют сплавы меди с другими элементами – латуни и бронзы.

Латуни. Сплав меди с цинком называется латунью. Механические свойства латуни – прочность и пластичность – выше, чем меди, она хо-

рошо обрабатывается резанием, давлением, характеризуется высокими коррозионной стойкостью, теплопроводностью, электропроводностью (рис. 3.11).

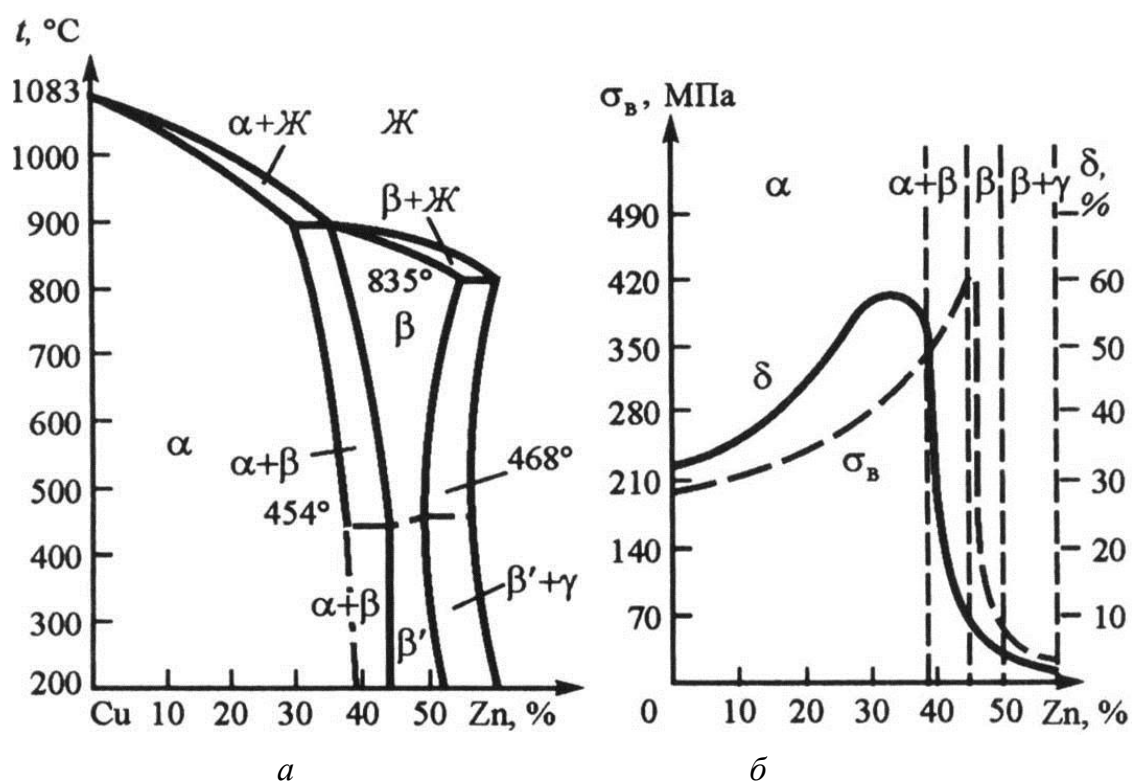


Рис. 3.11. Диаграмма состояния системы Cu–Zn (а) и зависимость механических свойств латуни от содержания цинка (б)

Большим преимуществом латуней является сравнительно низкая их стоимость, так как входящий в состав сплава цинк значительно дешевле меди. Максимальную прочность имеет латунь, содержащая 45 % цинка ($\sigma_{\text{в}} = 350$ МПа), а максимальную пластичность – латунь, содержащая 32 % цинка ($\delta = 55$ %). При увеличении содержания цинка выше 39 % резко падает пластичность, а выше 45 % – и прочность. Поэтому латуни, содержащие более 45 % цинка, не применяются. Подобное изменение свойств связано со структурой латуней. Медь и цинк образуют целый ряд твердых растворов.

При содержании цинка до 39 % латунь является однофазной и структура её представляет собой α -твёрдый раствор цинка в меди с гранецентрированной кубической решеткой (α -латунь). При большем содержании цинка латунь является двухфазной: в её структуре появляется хрупкая β -фаза, представляющая собой твёрдый раствор на базе соединения Cu и Zn с объемно-центрированной кубической решеткой ($\alpha+\beta$ латунь) (рис. 3.12).

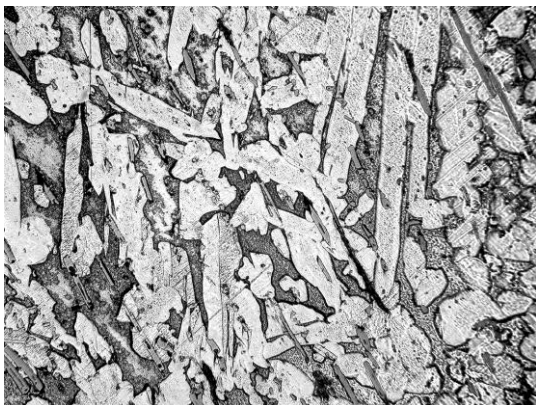


Рис. 3.12. Микроструктура двухфазной латуни ЛМцСКА ($\times 300$)

По технологическому признаку латуни делятся на литейные и деформируемые (обрабатываемые давлением).

Латуни маркируются буквой Л. В деформируемых латунях указывается содержание меди и легирующих элементов, которые обозначаются соответствующими буквами (О – олово, А – алюминий, К – кремний, Н – никель, Мц – марганец, Ж – железо, С – свинец). Содержание элементов дается в процентах после всех буквенных обозначений. Например, латунь Л63 содержит 63 % меди и 37 % цинка. Латунь ЛАЖ 60-1-1 содержит 60 % меди, 1 % алюминия, 1 % железа и 38 % цинка. В марках литейных латуней указывается содержание цинка, а количество легирующих элементов (в %) ставится после букв, их обозначающих. Например, литейная латунь ЛЦ40Мц3А содержит 40 % цинка, 3 % марганца, менее 1 % алюминия и 56 % меди. Простые латуни выпускают следующих марок: Л96, Л90, Л85, Л70, Л68, Л63, Л60. Все они являются деформируемыми, а по структуре однофазными (кроме Л60). Наибольшее применение имеют латуни, содержащие 90, 80, 70 и 68 % меди.

Бронзы. Сплав меди с оловом, алюминием, свинцом и другими элементами, среди которых цинк и никель не являются основными, называют бронзой. По основному легирующему элементу бронзы делятся на оловянные, алюминиевые, кремнистые, бериллиевые, свинцовые и др. Бронзы обладают хорошими литейными свойствами, хорошо обрабатываются давлением и резанием. Большинство бронз отличаются высокой коррозионной стойкостью и, кроме того, широко используются как антифрикционные сплавы.

По технологическому признаку бронзы делят на деформируемые и литейные. Маркируются бронзы буквами Бр, за которыми показывается содержание легирующих элементов в %. Обозначения легирующих элементов и отличия в марках деформируемых и литейных сплавов у бронз

При содержании цинка более 45 % структура латуни состоит только из β -фазы.

По химическому составу различают простую (двойную) латунь, в которой содержатся только медь и цинк, и сложную (специальную), в которой кроме цинка содержатся легирующие элементы: никель, свинец, олово, кремний и др. Специальная латунь отличается повышенной прочностью, лучшими антикоррозионными и технологическими свойствами.

такие же, как у латуней. Например, деформируемая бронза БрОФ 6,5-0,4 содержит 6,5 % олова и 0,4 % фосфора, а литейная бронза БрОЗЦ7С5Н – 3 % олова, 7 % цинка, 5 % свинца, менее 1 % никеля.

Особенно широкое применение в машиностроении имеют оловянные бронзы (рис. 3.13).

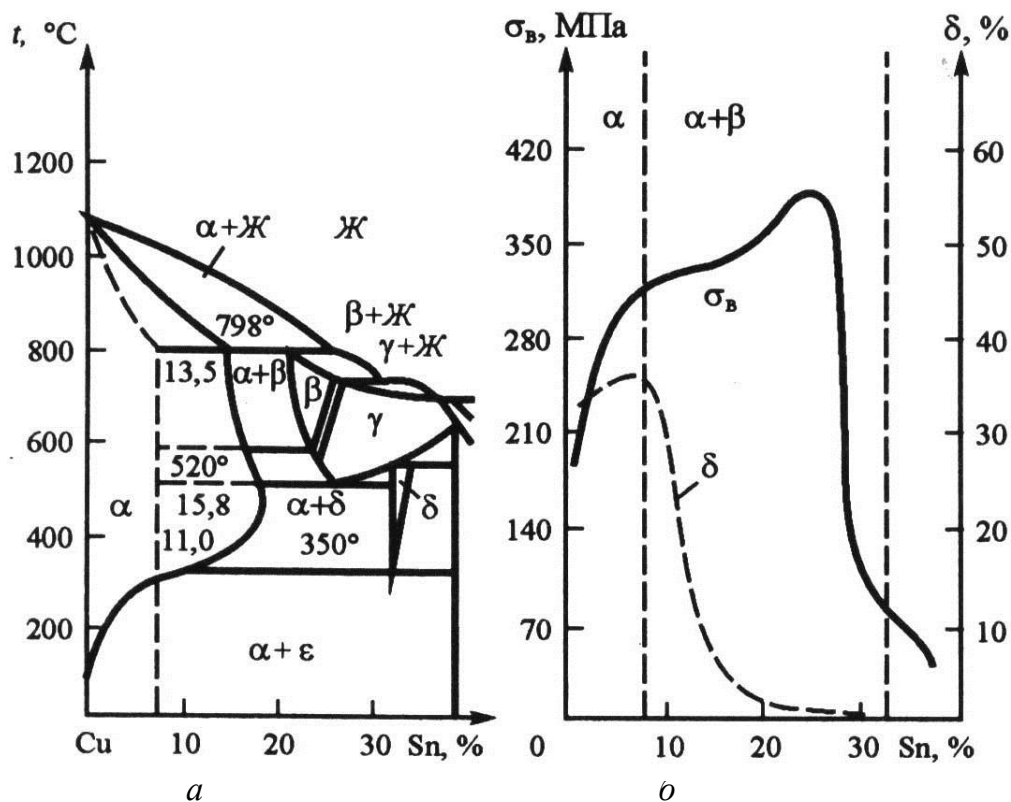


Рис. 3.13. Диаграмма состояния системы Cu–Sn (а) и зависимость механических свойств бронзы от содержания олова (б)

Они обладают высокими механическими ($\sigma_b = 150-350$ МПа; $\delta = 3-15\%$; 60-90 НВ) и антифрикционными свойствами, коррозионной стойкостью, хорошо отливаются и обрабатываются резанием. По структуре оловянные бронзы, подобно латуням, бывают однофазными и двухфазными. Обычно вторая фаза выделяется при содержании олова больше 7-9 % (рис. 3.14).

Однофазные оловянные бронзы, имеющие высокую пластичность, используются в качестве деформируемых, двухфазные – в качестве литейных. Для улучшения качества в оловянную бронзу вводят свинец, повышающий антифрикционные свойства и обрабатываемость; цинк, улучшающий литейные свойства; фосфор, повышающий литейные, механические и антифрикционные свойства.

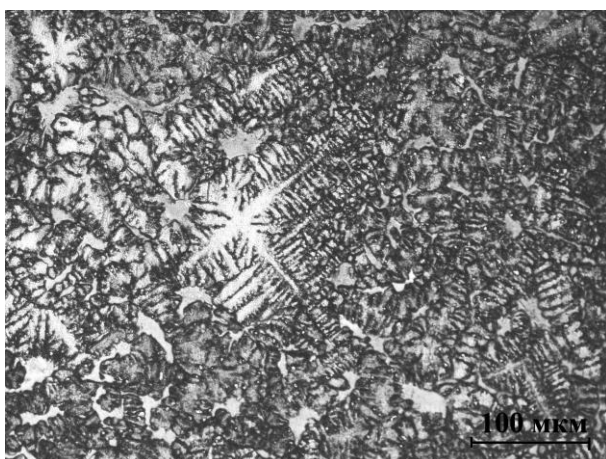


Рис. 3.14. Микроструктура двухфазной оловянной бронзы ($\times 300$)

пластичностью и упругостью. Из них изготавливают прутки, трубы, ленты. Бронзу БрОФ6,5-1,5 применяют для изготовления пружин, мембран, антифрикционных деталей; БрОЦ4-3, БрОЦС4-4-2,5 для производства плоских и круглых пружин, антифрикционных деталей.

Литейные оловянные бронзы БрО5Ц5С5, БрО6Ц6С2, БрО10Ф1 и др. применяют для получения деталей машин, работающих в условиях морской и пресной воды, для изготовления антифрикционных деталей (вкладышей подшипников скольжения). Литейные оловянные бронзы имеют самую низкую усадку и наилучшую жидкотекучесть среди всех медных сплавов.

Деформируемые оловянные бронзы обладают высокой

4. ИЗМЕНЕНИЕ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Любая деталь механизма или конструкции, работающая под нагрузкой, испытывает деформацию той или иной величины и знака. *Деформацией* называется изменение формы и размеров тела под действием нагрузки. Деформация, исчезающая после снятия нагрузки, называется *упругой*, а сохраняющаяся – *пластической*. В основе упругих деформаций лежат обратимые смещения атомов от положения равновесия. В основе пластических деформаций – необратимые перемещения атомов на значительные расстояния от исходного положения равновесия.

Механизм пластической деформации. Пластическая деформация в кристалле осуществляется путем сдвига одной его части относительно другой. Сдвиг вызывают касательные напряжения, когда их значение превышает критическое напряжение. Имеется две разновидности сдвига: *скольжение* и *двойникование*. Рассмотрим только один из них – скольжение. При скольжении одна часть кристалла смещается параллельно другой части вдоль плоскости, называемой плоскостью скольжения. Скольжение развивается по плоскостям, на которых плотность атомов максимальна. У разных типов кристаллической решетки – разное количество плоскостей скольжения. Увеличение количества плос-

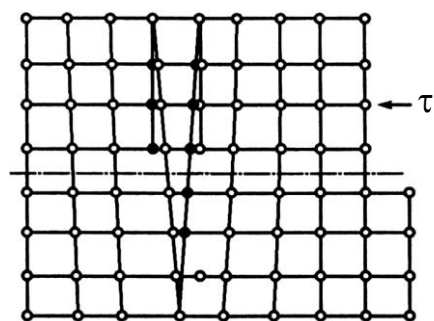


Рис. 4.1. Схема перемещения атомов при скольжении краевой дислокации

костей скольжения сопровождается повышением способности металла к пластической деформации. Пластическое деформирование при скольжении осуществляется путем последовательного перемещения дислокаций. Схема перемещения атомов при скольжении краевой дислокации представлена на рис. 4.1.

Под действием напряжения дислокация легко движется в плоскости скольжения (на рис. 4.1. плоскость скольжения указана линией штрих-точка). Сдвиг на одно межатомное расстояние представляет собой согласованную перегруппировку атомов около дислокации и не сопровождается диффузионным переносом массы. Этому способствуют упругие искажения кристалла около дислокации, облегчающие разрыв старых и образование новых межатомных связей. Перемещаясь каждый раз на величину межатомного расстояния, дислокация выйдет на поверхность кристалла, и здесь появится ступенька. Так как в плоскости

скольжения движутся сотни дислокаций, то в результате их выхода на поверхность высота ступеньки будет увеличиваться. Такая ступенька, видимая под микроскопом, называется линией скольжения.

При деформации поликристаллов деформация зерен начинается сразу по нескольким плоскостям скольжения и сопровождается изменением формы зерен. Они вытягиваются в направлении пластического течения.

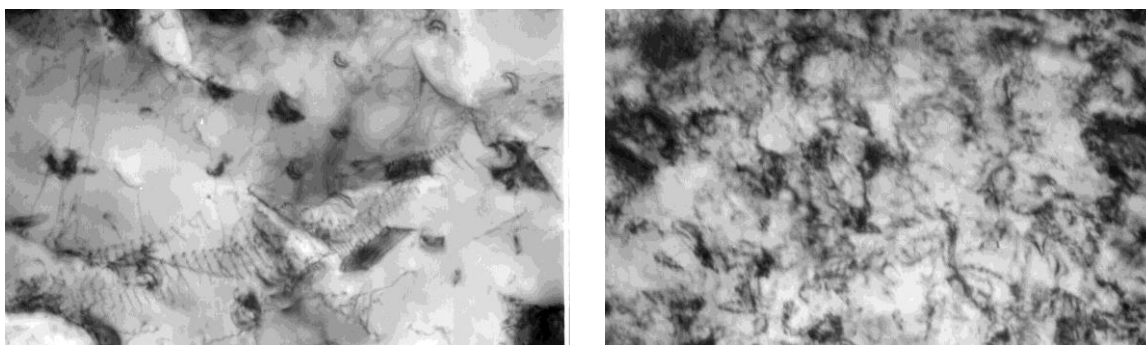
4.1. Основные механизмы упрочнения сплавов

Механические свойства металла или сплава определяются его способностью пластически деформироваться. Чем легче материал деформируется, тем выше его пластичность и ниже прочность. Сопротивление деформированию металлических материалов в кристаллическом состоянии формируется четырьмя принципиально различными механизмами. Это *твердорастворное, дислокационное, зернограничное и дисперсионное упрочнение*. В современных конструкционных материалах чаще всего используется комбинированное взаимодействие нескольких из этих механизмов, нередко всех четырех.

Твердорастворное упрочнение основано на введении в кристаллическую решетку металла атомов замещения или внедрения. При этом кристаллическая решетка основного металла искажается вследствие различного размера атомов, образующих твердый раствор. Особенно большие смещения атомов возникают при образовании твердых растворов внедрения (например, атомы углерода или азота в железных сплавах). Дислокации при своем движении должны преодолевать искажения кристаллической решетки, что затрудняет деформацию.

Данный механизм упрочнения проявляется при формировании любых сплавов с твердым раствором. Поэтому чистые металлы всегда имеют прочность ниже, чем сплавы на их основе.

Дислокационное (субструктурное) упрочнение достигается при формировании или скоплении в кристаллической решетке большого числа дислокаций вплоть до плотностей $10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Дислокации, скользящие через хаотически расположенные неподвижные дислокации, испытывают со стороны последних сопротивление. Благодаря упругому взаимодействию и междислокационным реакциям, дислокации не сохраняют хаотическое расположение, а создают различные субструктуры, отличающиеся определенным порядком в их расположении (рис. 4.2).



а

б

Рис. 4.2. Электронно-микроскопическое изображение дислокационной структуры в технически чистом титане: а – хаотически расположенные дислокации; б – упорядоченная дислокационная субструктура (× 25000)

Сопротивление движению дислокации через упорядоченное расположение дислокаций (субструктуру) отличается от сопротивления при движении через хаотическое распределение дислокаций. Если в последнем случае оно зависит только от плотности дислокаций, то при организации субструктуры оно уже зависит от параметров последней. Это явление и называется субструктурным упрочнением. В формировании прочности закаленной стали оно дает значительный вклад, порой превышающий вклад твердорастворного упрочнения.

В последнее время развиваются технологии, позволяющие создать определенные субструктуры в металлических сплавах, обеспечивающие им стабильные прочностные свойства.

Зернограничное (поликристаллическое) упрочнение. Большинство используемых материалов – поликристаллы. Наличие границ зерен в поликристалле приводит к его упрочнению. При определенном значении напряжения дислокации не могут перейти через границу в другое зерно и начинают тормозиться. Для преодоления границы им необходимо дополнительное напряжение. Экспериментально установлено, что с уменьшением среднего размера зерна d сопротивление деформированию $\Delta\sigma$ возрастает в соответствии с эмпирическим соотношением:

$$\Delta\sigma = k d^{-1/2},$$

где k – коэффициент, не зависящий от размера зерна.

В последние годы интенсивно развиваются технологии, связанные с использованием поликристаллических материалов с субмикрости-

сталлическим размером зерен. Таким путем удастся значительно повысить сопротивление деформированию. В настоящее время разработаны сплавы промышленного применения на основе алюминия и меди со стабильным размером зерен 0,1 – 0,4 мкм.

Дисперсионное упрочнение, или *упрочнение дисперсными частицами*, заключается в образовании мелких выделений второй фазы в матрице основного металла или сплава. Эти выделения могут иметь ту же самую или иную кристаллическую решетку, создавать поля напряжений, быть перерезаемыми или неперерезаемыми для дислокаций. В любом случае они создают дополнительные препятствия для движения дислокаций и могут значительно повышать прочность материала (рис. 4.3).

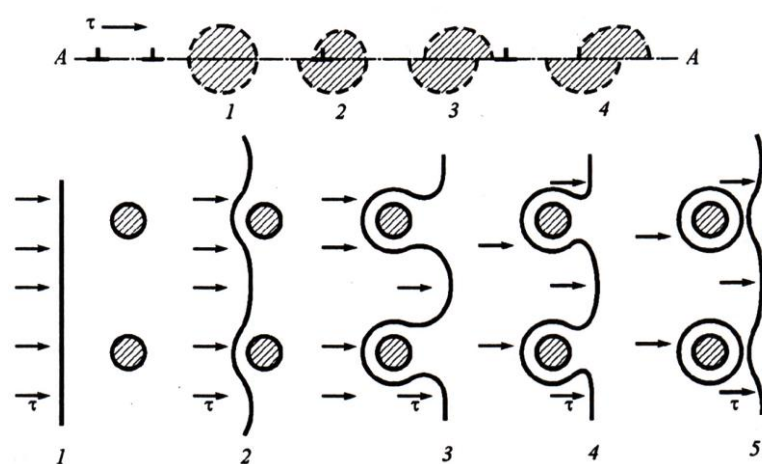


Рис. 4.3. Схема перемещения дислокации в двухфазных сплавах при перерезании частиц второй фазы (а) и при образовании дислокационных петель (б): 1 - 5 – последовательные стадии перемещения дислокаций

Таким механизмом повышают прочность отпущенной или стареющей стали и многих алюминиевых и никелевых сплавов. В структуре сплавов могут формироваться дисперсные частицы карбидов (например: Fe_3C , Cr_{23}C_6 , TiC), интерметаллических соединений (например: Co_7W_6 , CuAl_2), оксидов (например: SiO_2 , Al_2O_3) и др.

4.2. Наклеп и рекристаллизация

Для описания явления наклепа рассмотрим холодную пластическую деформацию поликристаллических материалов, которыми являются металлы и сплавы. Как описывалось выше, деформация поликристаллического тела складывается из деформации отдельных зерен. Плоскости скольжения зерен произвольно ориентированны в пространстве, поэтому под влиянием внешних сил напряжения в плоскостях скольжения отдельных зерен будут различны. Деформация начинается в отдельных зернах, в плоскостях скольжения которых возни-

кают 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. Изменение структуры при деформации показано на рис. 4.4.

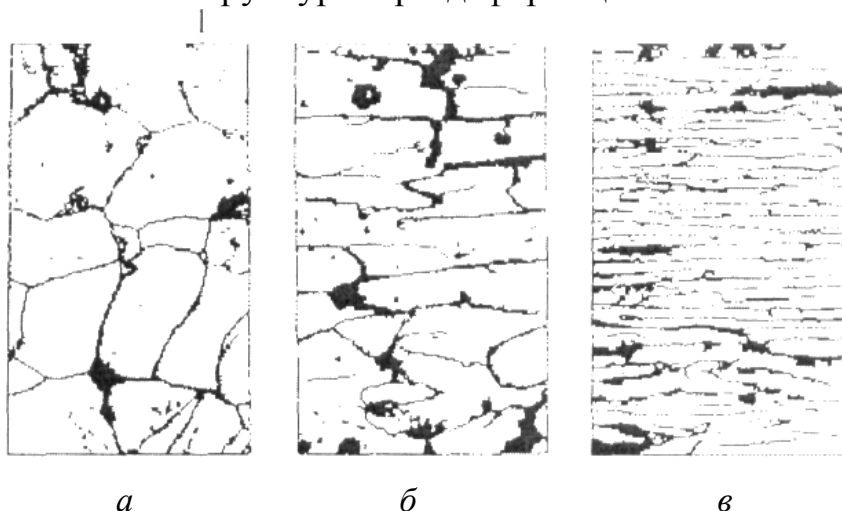


Рис. 4.4. Изменение структуры при деформации: а) до деформации; б) после обжатия на 35%; в) после обжатия на 90%

Кристаллические решетки большинства зерен получают одинаковую ориентировку – возникает *текстура деформации*. Текстура деформации создает кристаллическую анизотропию (разницу свойств по направлениям). Металл приобретает волокнистое строение.

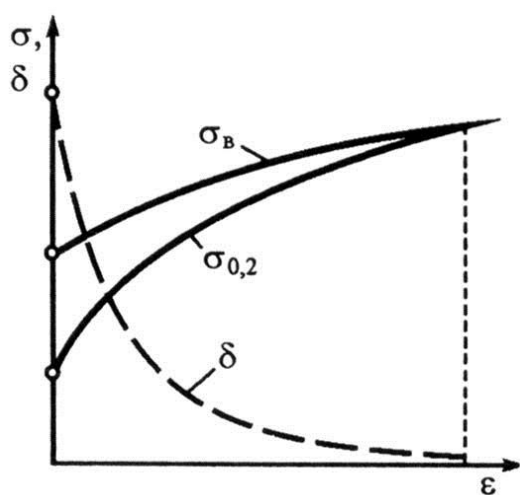


Рис. 4.5. Зависимость механических свойств от степени деформации

С увеличением степени деформации характеристики пластичности и вязкости уменьшаются, а прочностные характеристики и твердость увеличиваются (рис. 4.5).

Также повышается электросопротивление, снижаются сопротивление коррозии, теплопроводность, магнитная проницаемость. 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, формированием ячеистой дислокационной субструктуры, искажениями кристаллической решетки и возникновением внутренних напряжений. Свободное перемещение дислокаций затрудняется, включается механизм *дислокационного (субструктурного) упрочнения*.

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. Эти процессы называются *возврат* и *рекристаллизация*.

Возврат – это небольшой нагрев деформированного металла, вызывающий ускорение движения атомов, снижение плотности дислокаций, устранение внутренних напряжений и восстановление кристаллической решетки.

Первая стадия возврата называется *отдыхом* – процесс перераспределения и уменьшения концентрации точечных дефектов путем их аннигиляции, а также перераспределения дислокаций без образования новых границ. Вторая стадия возврата называется *полигонизация* – процесс деления зерен на части – фрагменты, полигоны в результате скольжения и переползания дислокаций. В ячеистой дислокационной субструктуре, сформированной при пластической деформации, противознаковые дислокации аннигилируют, а оставшиеся выстраиваются в дислокационные стенки, формируя новые малоугловые границы зерен (рис. 4.6).

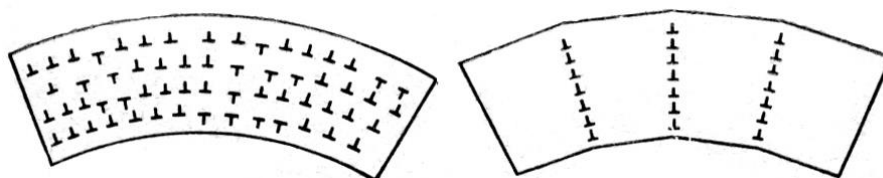


Рис. 4.6. Схема процесса полигонизации

Возврат происходит при температуре $T = (0,25...0,3) \cdot T_{пл}$. При этом происходит частичное разупрочнение и восстановление свойств.

Возврат уменьшает искажение кристаллической решетки, но почти не влияет на размеры и форму зерен, сохраняя текстуру деформации.

Рекристаллизация. При нагреве до достаточно высоких температур подвижность атомов возрастает и происходит *рекристаллизация* – процесс зарождения и роста новых недеформированных зерен исходной фазы при нагреве наклепанного металла до определенной температуры. Температура начала рекристаллизации связана с температурой плавления:

$$T_{\text{рек}} = \alpha \cdot T_{\text{пл}},$$

где для металлов высокой чистоты $\alpha = 0,1...0,2$; для технически чистых металлов $\alpha = 0,4$; для твердых растворов $\alpha = 0,5...0,8$.

Рекристаллизация проходит в несколько стадий. Первая стадия рекристаллизации – *первичная рекристаллизация* заключается в образовании центров роста 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 деформированных зерен со старой структурой (рис. 4.7).

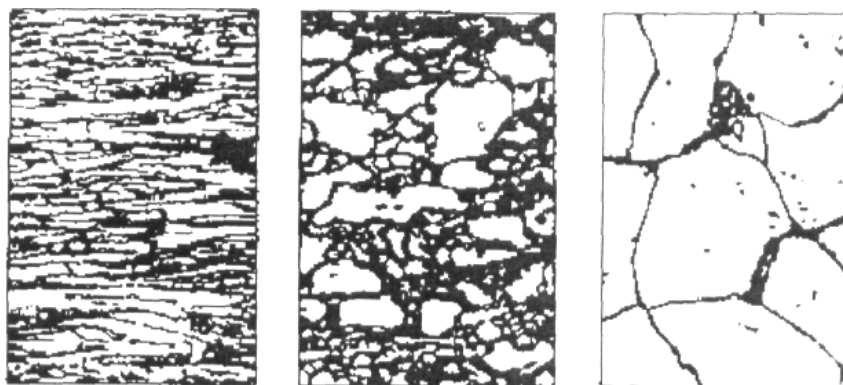


Рис. 4.7. Изменение структуры деформированного металла при первичной рекристаллизации

Движущей силой первичной рекристаллизации является энергия, аккумулированная в наклепанном металле. Система стремится перейти в устойчивое состояние с неискаженной кристаллической решеткой.

Вторая стадия рекристаллизации – *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 (рис. 4.8а).

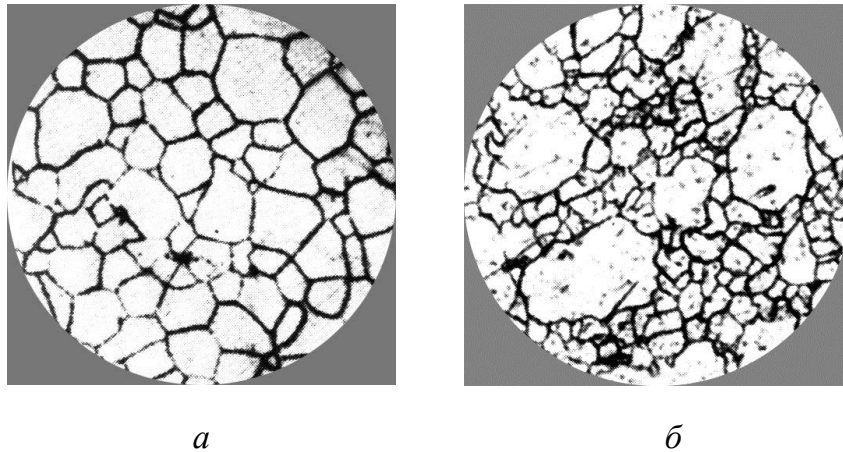


Рис. 4.8. Структура деформированного металла после собирательной (а) и вторичной (б) рекристаллизации

Третья стадия рекристаллизации – *вторичная рекристаллизация* – представляет собой стадию неравномерного роста одних рекристаллизованных зерен по сравнению с другими. В результате формируется конгломерат зерен-гигантов, соседствующих с зернами-карликами (рис. 4.8б).

Нагрев металла до температур рекристаллизации сопровождается резким изменением не только микроструктуры, но и свойств.

Нагрев приводит к резкому снижению прочности при одновременном возрастании пластичности. Также снижается электросопротивление и повышается теплопроводность.

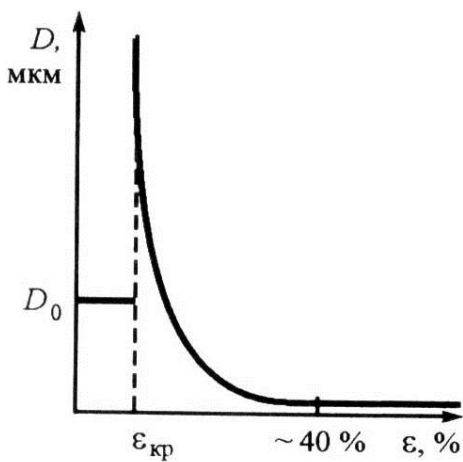


Рис. 4.9. Влияние предварительной степени деформации металла на величину зерна после рекристаллизации

На свойства металла большое влияние оказывает размер зерен, получившихся при рекристаллизации. Наиболее крупные зерна образуются после незначительной предварительной деформации 3...10 %. Такую деформацию называют *критической* (рис. 4.9). И такая деформация нежелательна перед проведением рекристаллизационного отжига.

Практически рекристаллизационный отжиг проводят для малоуглеро-

дистых сталей при температуре 600...700 °С, для алюминиевых сплавов – 350...450 °С, для титановых сплавов – 550...750 °С, для латуней и бронз – 560...700 °С.

Деформация, которая осуществляется при температуре ниже температуры рекристаллизации, называется *холодной деформацией*. Холодная деформация сопровождается наклепом металла.

Если деформирование металла происходит при температуре выше температуры рекристаллизации, то наклеп после деформации не возникает. Такая деформация называется *горячей деформацией*. При горячей деформации упрочнение, создаваемое в процессе деформации, снимается в результате рекристаллизации в ходе самой деформации.

Поверхностное пластическое деформирование. Эффективным способом упрочнения готового изделия является пластическое деформирование лишь поверхностного слоя детали. Наклепу подвергают готовые детали, прошедшие механическую и термическую обработку. Самыми распространенными методами поверхностной пластической деформации (ППД) является дробеструйная обработка и обкатка поверхности роликами.

При дробеструйной обработке на поверхность деталей из специальных дробемеров с большой скоростью направляют поток стальной дроби диаметром 0,5-1,5 мм. Дробеструйной обработке подвергают поверхность рессор и пружин, зубчатых колес, звеньев гусениц, гильз и поршней. В результате дробеструйной обработки предел выносливости рессор увеличивается в 1,5 раза, и в несколько раз возрастает их долговечность.

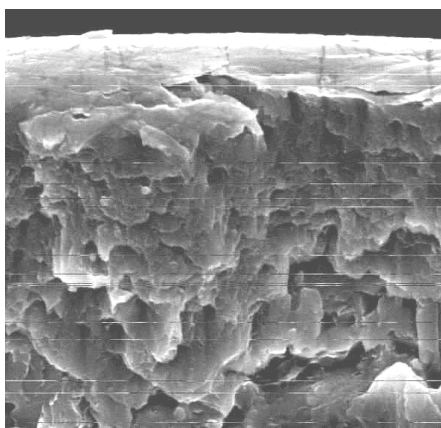


Рис. 4.10. Изображение излома стали 40X13 после ультразвуковой обработки (×1000)

Обкатку роликами проводят с помощью специальных приспособлений на обычных токарных или строгальных станках. Давление на ролики осуществляется гидравлически или с помощью пружин. Обкатку роликами применяют для обработки шеек валов, осей железнодорожных вагонов, коленчатых валов и других деталей. Помимо упрочнения, обкатка повышает чистоту обрабатываемой поверхности.

К современным методам поверхностной пластической деформации относится ультразвуковая финишная обработка, когда упрочнение и выглаживание поверхности осуществляется за-

крепленным в суппорте токарного станка инструментом, нормально колеблющимся с ультразвуковой частотой и обеспечивающим деформацию сжатия и сдвига, возникающую в результате воздействия на поверхность смещаемой детали индентора – шарика из твердого сплава. Ультразвуковые колебания, возбужденные в поверхности, облегчают и интенсифицируют процесс пластической деформации и упрочнения поверхностного слоя детали (рис. 4.10).

4.3. Изменение условий кристаллизации сплава

Изменение условий кристаллизации – еще один способ влияния на формирование структуры и свойств материалов.

Форма и размер зерен, образующихся при кристаллизации, зависят от условий их роста, главным образом от скорости и направления отвода тепла и температуры жидкого металла, а также от содержания примесей.

Для металлов при кристаллизации характерно формирование разветвленных, древовидных кристаллов – *дендритов* (рис. 4.11). Дендриты растут в жидкой фазе до тех пор, пока не соприкоснутся между собой.

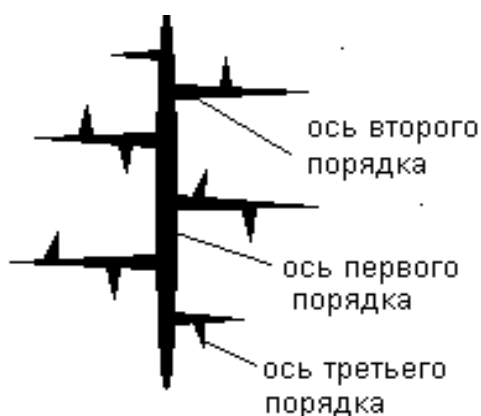


Рис. 4.11. Схема строения дендрита

После этого окончательно заполняются межосные пространства, и дендриты превращаются в полновесные кристаллы с неправильной внешней огранкой – зерна.

Условия отвода тепла при кристаллизации значительно влияют на форму зерен. Кристаллы растут преимущественно в направлении, обратном отводу теплоты. Поэтому при направленном теплоотводе образуются вытянутые (столбчатые) кристаллы.

Если теплота от растущего кристалла отводится во всех трех направлениях с приблизительно одинаковой скоростью, формируются равноосные кристаллы.

Разные условия отвода тепла при кристаллизации приводят к тому, что строение литых деталей различно в разных участках отливки. Так, кристаллизация слитка начинается около стенки формы, в которую заливается жидкий металл (рис. 4.12а). Здесь наиболее высокая скорость охлаждения и степень переохлаждения металла, и поэтому образуются мелкие кристаллы (зёрна).

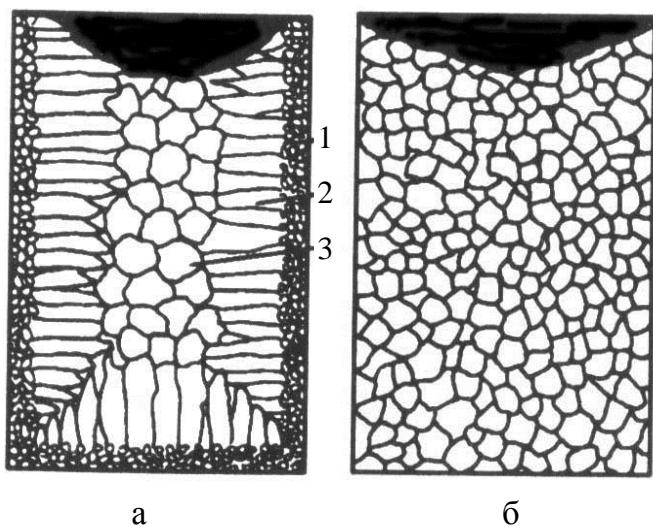


Рис. 4.12. Схемы микроструктуры слитков: а – типичная; б – однородная мелкозернистая

Эта первая зона слитка называется *коркой* (зона 1). Вглубь от стенки формы к центру снижаются скорость охлаждения и степень переохлаждения металла. Это приводит к увеличению размера зерен. В этой зоне растут зёрна, вытянутые в направлении, обратном теплоотводу. Эту зону называют *зоной столбчатых кристаллов* (зона 2). В центральной части слитка формируется зона 3 – *зона крупных неориентированных зёрен*.

Наиболее высокие свойства имеет металл первой зоны – корки. Размер зон зависит от скорости охлаждения металла, состава и температуры заливаемого в форму металла. Кроме того, в жидком металле содержатся газы, и при охлаждении могут образовываться газовые пузыри и пустоты, называемые *усадочными раковинами*.

Применяя различные технологические приемы, можно изменить количественное соотношение зон или исключить из структуры слитка какую-либо зону вообще. Например, низкая температура разливки сплавов, вибрация, модифицирование приводят к уменьшению и даже исчезновению зоны столбчатых кристаллов и получению слитков со структурой, состоящей из равноосных кристаллов (рис. 4.12, б).

На свойства кристаллизованного металла, в первую очередь, влияет не форма образующихся кристаллов, а их размер.

На размер зерна при кристаллизации влияют условия охлаждения. Существует зависимость числа центров кристаллизации и скорости роста кристаллов от *степени переохлаждения* металла ΔT .

Графики, приведенные на рисунке 4.13, показывают, что число центров кристаллизации и скорость роста кристаллов изменяются по закону кривых распределения, то есть кривых с максимумом. Размер образовавшихся кристаллов зависит от соотношения числа центров кри-

сталлизации и скорости роста кристаллов при температуре кристаллизации, то есть от степени переохлаждения жидкого металла.

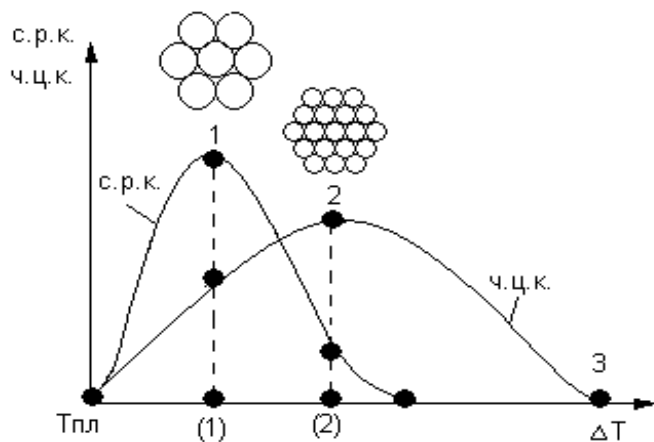


Рис. 4.13. Зависимость числа центров кристаллизации (ч.ц.к.) и скорости роста кристаллов (с.р.к.) от степени переохлаждения металла ΔT

При равновесной температуре $T_{пл}$ число центров кристаллизации и скорости роста кристаллов равны 0, и процесс кристаллизации не идет. При минимальном переохлаждении в условиях формирования одного центра кристаллизации образуется *монокристалл*.

Если жидкий металл переохладить до температуры, соответствующей точке 1, то образуются *крупные зерна* вследствие того, что скорость роста кристаллов высока, число центров кристаллизации мало.

При переохлаждении, соответствующем точке 2, образуются *мелкие зерна*, так как скорость роста кристаллов мала, а центров кристаллизации много.

Если очень сильно переохладить жидкость до точки 3, то число центров кристаллизации и скорость роста кристаллов равны 0, и жидкость не кристаллизуется, а образуется *аморфное тело*.

Размер зерен, образующихся при кристаллизации металла, зависит также от количества частиц нерастворимых примесей, находящихся в металле. Эти частицы играют роль готовых центров кристаллизации. Такими частицами являются окислы, нитриды, бориды, сульфиды и другие соединения. Чем больше таких частиц, тем мельче будут зерна закристаллизовавшегося металла.

Часто для получения мелкозернистого металла в жидкий металл добавляют специальные вещества — *модификаторы* (тугоплавкие соединения — карбиды, бориды, нитриды, окислы, а также Mg, Na). Эти модификаторы измельчают зерна металла и повышают его свойства.

Размер зерна в кристаллизованной структуре влияет на весь комплекс механических свойств. С измельчением зерна повышается прочность, твердость и ударная вязкость отливки. В первую очередь, это обеспечивается механизмом *зернограничного упрочнения*.

В монокристаллах и аморфных веществах формируется особое строение с особыми свойствами.

Монокристаллы можно получить, если создать условия для роста кристалла только из одного центра кристаллизации. Существует несколько технологических методов, в которых использован этот принцип. Например, такая структура формируется при вытягивании моно-



Рис. 4.14. Монокристаллы диаметром 30...35 мм, полученные в Сибирском физико-техническом институте, г. Томск

кристалла из расплава, благодаря направленной кристаллизации из одного центра, для чего используется монокристаллическая затравка с заданной кристаллографической ориентацией (рис. 4.14). Очень перспективно выращивание монокристаллов в космосе, где удачно сочетаются глубокий вакуум и невесомость. Монокристаллы, выращенные в космосе, совершеннее по структуре, распределению примесей, лучше по свойствам и значительно больше по размерам.

Монокристаллы отличаются минимальными структурными несовершенствами. Получение монокристаллов позволяет изучать свойства металлов, исключив влияние границ зерен. Применение в монокристаллическом состоянии германия и кремния высокой чистоты дает возможность использовать их полупроводниковые свойства и свести к минимуму неконтролируемые изменения электрических свойств.

Примером промышленного использования монокристаллической структуры является производство лопаток для газотурбинного двигателя из жаропрочного никелевого сплава. Монокристаллическая структура лопаток, уменьшение количества и размера пор обеспечивают существенное повышение прочностных характеристик. Предел прочности, предел текучести при 20 °С и сточасовая длительная прочность при 1100 °С увеличиваются приблизительно в 2 раза.

Аморфные металлические сплавы. При сверхвысоких скоростях охлаждения из жидкого состояния ($>10^6$ °С/с) диффузионные процессы настолько замедляются, что подавляется образование зародышей и рост кристаллов. В этом случае при затвердевании образуется аморфная структура (рис. 4.15).

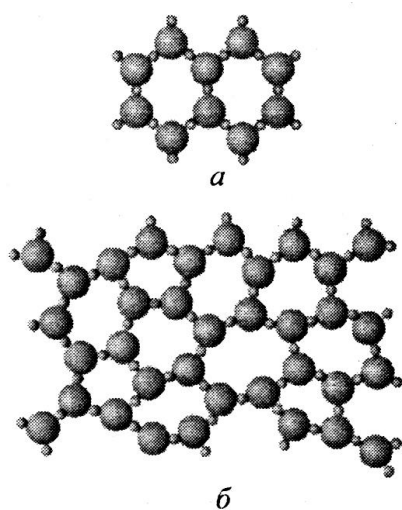


Рис. 4.15. Различие в строении: а – кристаллических и б – аморфных тел

Материалы с такой структурой получили название *аморфные металлические сплавы* или *металлические стекла*. Затвердевание с образованием аморфной структуры принципиально возможно практически для всех металлов. В настоящее время аморфная структура получена у более чем 200 сплавов и полупроводниковых материалов.

Аморфные металлические сплавы значительно отличаются от своих кристаллических аналогов по строению и, следовательно, по свойствам. В их структуре отсутствует дальний порядок в размещении атомов и характерные особенности структуры поликристаллических сплавов: границы зерен, дислокации и

другие дефекты. Границей сохранения аморфного состояния является температура рекристаллизации $t_p \approx 0,5 \cdot t_{пл}$.

По сравнению с кристаллическими аналогами, аморфные металлические сплавы имеют более низкую плотность, на 20 – 40 % ниже модуль упругости и в 2...4 раза больше удельное электросопротивление. Аморфные металлические сплавы имеют высокий предел прочности 2000...4000 МПа, но при растяжении разрушаются с малым удлинением ($\delta < 1\%$). В то же время при сжатии деформируются на 40 - 50 % без разрушения. Особенностью является отсутствие наклепа при различных технологических операциях. Ленты из аморфных металлических сплавов изгибаются на 180° до параллельности сторон.

Сверхвысокие скорости охлаждения жидкого металла для получения аморфной структуры можно реализовать такими способами, как катапультирование капли на холодную пластину, центрифугирование капли или струи, распыление струи газом или жидкостью с высокой охлаждающей способностью и др. Большое практическое значение имеет возможность получения аморфных металлов в виде ленты, проволоки диаметром несколько микрометров непосредственно при литье.

Нанокристаллические материалы. Так называют материалы со структурой, состоящей из кристаллических зерен размером до 100 нм. В таких материалах от 2 до 50% объема приходится на межзеренные или межфазные границы. Поэтому нанокристаллический материал может быть разделен на два структурных компонента: кристаллический, который включает в себя атомы, расположенные внутри кристаллитов, и

межкристаллитный, образуемый из всех атомов, расположенных на границе. Расположение в пространстве граничных атомов отличается

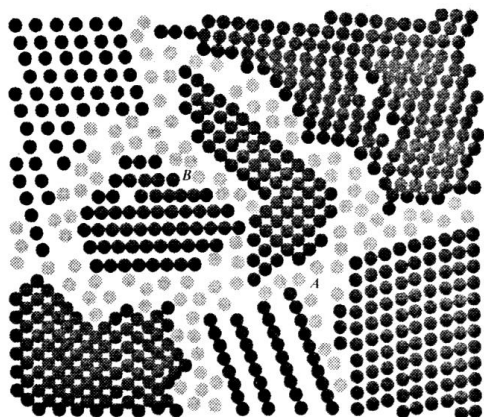


Рис. 4.16. Схематическое изображение структуры нанокристаллического материала: черные кружки – атомы в кристаллитах, серые – атомы в межзеренных границах

от расположения решеточных атомов. В кристаллитах имеется дальний порядок расположения атомов (корреляция микроструктуры вещества в пределах всего макроскопического образца). Межкристаллитный компонент представляет собой огромную сумму различных положений атомов в пространстве, задаваемых различно ориентированными зернами. Хаотичное расположение атомов в границе – характерная черта нанокристаллических материалов (рис. 4.16).

Эксперименты показывают, что прочность и твердость нанокристаллических материалов значительно выше, чем их крупнозернистых аналогов. Упрочнение связано с большой объемной долей межзеренных границ, препятствующих распространению дислокаций. Так как в нанометровых кристаллитах отсутствуют дислокации, можно считать, что нанометровые размеры кристаллитов – это основной источник прочности нанокристаллических материалов.

В таких материалах наблюдается также явление *сверхпластичности*. Сверхпластическая деформация наноматериалов происходит в результате зернограничного проскальзывания (контролируемого диффузией по границам зерен), без видимой дислокационной активности в зернах. Сверхпластичность реализуется при существенно более низких температурах и значительно более высоких скоростях деформации, чем в микрокристаллических аналогах.

Удельное электросопротивление нанокристаллических материалов выше, чем у соответствующих аналогов, так как электроны проводимости сильнее рассеиваются на границах зерен. Так, у нанокристаллической меди с размером зерна 100 нм удельное электросопротивление при 20 °С возрастает на 15%, а уменьшение диаметра зерна меди до 7 нм повышает удельное электросопротивление в несколько раз.

В компактном виде нанокристаллические материалы получают тремя способами:

- 1 – переработкой частиц размером < 100 нм методами порошковой технологии в компактный материал;
- 2 – кристаллизацией аморфных металлических сплавов в контролируемых условиях;
- 3 – рекристаллизационным отжигом интенсивно деформированных металлических сплавов.

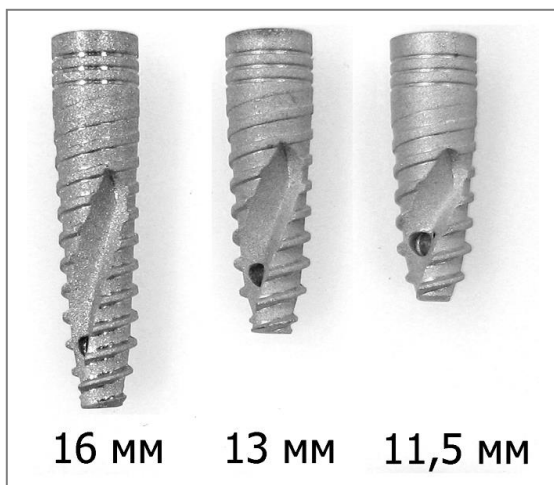


Рис. 4.17. Дентальные имплантанты из ультрамелкозернистого титана BT1-0

Например, в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск) совместно с Сибирским химическим комбинатом и Новокузнецким государственным институтом усовершенствования врачей разработана технология производства дентальных имплантантов из ультрамелкозернистого титана (рис. 4.17).

Ультрамелкозернистый и наноструктурный титан получают методом многократного одноосного прессования в сочетании с прокаткой и последующим отжигом.

4.4. Термическая обработка сплавов

Термической обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твердых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счет изменения внутреннего строения и структуры. Цель термообработки – придание сплавам таких свойств, которые требуются в процессе эксплуатации изделий. В результате термообработки получают лучшее сочетание механических свойств. Иногда термообработка является промежуточной операцией, снижающей твердость стали и улучшающей ее обрабатываемость резанием.

Основные виды термической обработки – отжиг, закалка, отпуск и старение.

Отжиг – термическая обработка, в результате которой металлы или сплавы приобретают структуру, близкую к равновесной. Отжиг вызывает разупрочнение металлов, сопровождающееся повышением пластичности и снятием остаточных напряжений. Температура нагрева при отжиге зави-

сит от состава сплава и конкретной разновидности отжига. Скорость охлаждения с температуры отжига не велика.

Закалка – термическая обработка, в результате которой в сплавах образуется неравновесная структура. Неравновесные структуры в сплаве можно получить только в том случае, когда в сплавах имеются превращения в твердом состоянии: переменная растворимость, распад высокотемпературного твердого раствора по эвтектоидной реакции и т.п. Для получения неравновесной структуры сплав нагревают выше температуры фазового превращения в твердом состоянии, после чего быстро охлаждают, чтобы предотвратить равновесное превращение при охлаждении. Закалка может вызвать упрочнение сплава, как в случае закалки стали, а может и не изменить свойства, если закалка фиксирует высокотемпературный твердый раствор. В этом случае упрочнение сплава происходит при последующих операциях термообработки.

Отпуск – термическая обработка, в результате которой в предварительно закаленном сплаве происходит фазовое превращение, приближающее его структуру к равновесной. После отпуска происходит распад пересыщенного твердого раствора, сформировавшегося при закалке. Сочетание закалки с отпуском приводит к получению более высокого уровня механических свойств по сравнению с отожженным состоянием. Производят отпуск сплавов, испытывающих при закалке полиморфное превращение, – сталей, двухфазных алюминиевых бронз, титановых сплавов.

Старение – термическая обработка, в результате которой из пересыщенного твердого раствора выделяются мелкодисперсные частицы второй фазы, формирующие равновесную структуру. Старение закаленного сплава приводит к повышению прочности, без значительного снижения пластичности. Старение возможно в сплавах, не претерпевающих при закалке полиморфное превращение, – сплавы на основе алюминия, аустенитные стали, никелевые сплавы.

Рассмотрим превращения, происходящие в структуре сплавов, и изменение их свойств при термической обработке на примере углеродистой стали (отжиг, закалка, отпуск) и дуралюмина (отжиг, закалка, старение).

Превращения при нагреве стали. Нагрев стали при термообработке в большинстве случаев имеет целью перевод ее структуры в аустенит. Для получения однородного аустенита необходимо нагреть сплав до критической температуры выше линий GS диаграммы состояния Fe-Fe₃C (точки критических температур, называемые A_{c3}) и SE (точки критических температур, называемые A_{cm}). Для завершения превращения в стали при перекристаллизации ее в аустенит необходим перегрев выше критических температур на 30-50 °С и выдержка при этой температуре нужное вре-

мя. При дальнейшем нагреве выше критических точек A_{c3} и A_{cm} происходит рост аустенитных зерен. Рост зерна аустенита при нагреве стали оказывает большое влияние на строение стали после термообработки. Обычно чем крупнее зерно аустенита, из которого формируется равновесная структура, тем ниже предел прочности, ударная вязкость и выше склонность к образованию трещин, поэтому при термообработке всегда стремятся к получению мелкого зерна.

Превращения в стали при охлаждении (превращения аустенита). Аустенит устойчив только при температурах выше линии GSE. При охлаждении ниже этой линии он становится неустойчивым и начинает распадаться. При медленном охлаждении стали образуются структуры, соответствующие диаграмме Fe-Fe₃C. Вначале происходит выделение феррита (в доэвтектоидных сталях) или вторичного цементита (в заэвтектоидных сталях). При достижении критической точки A_{c1} (линия эвтектоидного превращения PSK) содержание углерода в аустените достигает 0,8 %, и происходит превращение аустенита в перлит. Это превращение заключается в распаде аустенита на феррит, почти не содержащий углерода, и цементит, содержащий 6,67 % С. Поэтому превращение сопровождается диффузией, перераспределением углерода. Диффузионные процессы происходят в течение некоторого времени, причем скорость диффузии резко падает с понижением температуры. Обычно изучают изотермическое превращение аустенита (происходящее при выдержке при постоянной температуре) для эвтектоидной стали. Влияние температуры на скорость и характер превращения представляют в виде диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 4.18). Диаграмма строится в координатах температура – логарифм времени. Выше температуры 727°С на

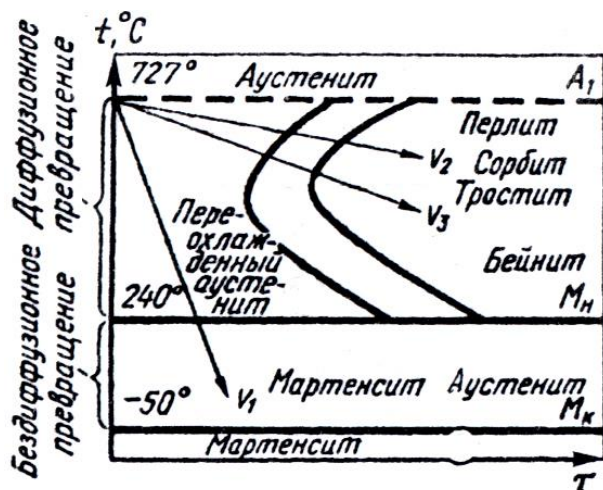


Рис. 4.18. Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали

диаграмме находится область устойчивого аустенита. Ниже этой температуры аустенит является неустойчивым и превращается в другие структуры. Первая С-образная кривая на диаграмме соответствует началу превращения аустенита, а вторая – его завершению. При небольшом переохлаждении – приблизительно до 550°C – происходит упомянутое выше диффузионное перлитное превращение (рис. 4.19).

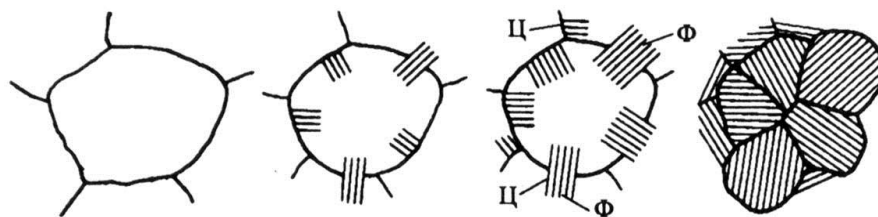


Рис. 4.19. Схема роста перлитных колоний (Ф – феррит, Ц – цементит)

В зависимости от степени переохлаждения образуются структуры, называемые *перлит*, *сорбит* и *тростит*. Это структуры одного типа – механические смеси феррита и цементита, имеющие пластинчатое строение. Отличаются они лишь степенью дисперсности, т.е. толщиной пластинок феррита и цементита. Наиболее крупнодисперсная структура – перлит, наиболее мелкодисперсная — тростит. По мере увеличения степени дисперсности структур изменяются и механические свойства стали – возрастают твердость и прочность и уменьшаются пластичность и вязкость. Твердость перлита составляет 180-250 НВ, сорбита – 250-350 НВ и тростита – 350-450 НВ.

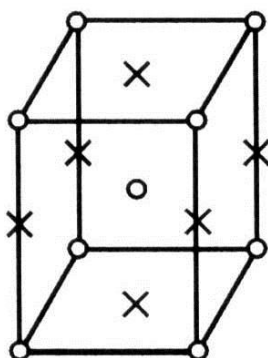


Рис. 4.20. Элементарная ячейка мартенсита

При переохлаждении аустенита приблизительно ниже 240 °С скорость диффузии падает почти до нуля и происходит бездиффузионное *мартенситное превращение*. Образуется *мартенсит* — пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -железе. Мартенсит имеет ту же концентрацию углерода, что и исходный аустенит. Из-за высокой пересыщенности углеродом решетка мартенсита сильно искажается, вытягиваясь и приобретая вместо кубической тетрагональную форму. Отношение параметров такой решетки c/a больше единицы (рис. 4.20). Благодаря этому, мартенсит имеет высокую твер-

дость (до HRC 65) и хрупкость.

Горизонтальная линия M_n диаграммы соответствует началу превращения аустенита в мартенсит, а линия M_k – завершению этого процесса. Мартенситное превращение происходит с очень высокой скоростью, так как оно является бездиффузионным и его скорость определяется скоростью полиморфного превращения γ -железа в α -железо (рис. 4.21).

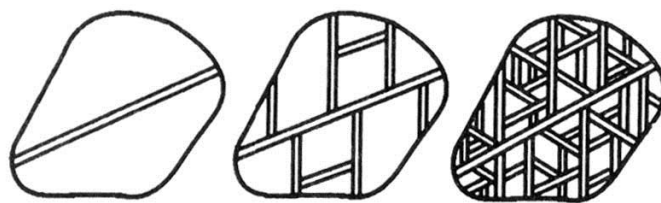


Рис. 4.21. Схема образования мартенситных пластин в одном аустенитном зерне

Положение точек начала и завершения мартенситного превращения зависит от содержания углерода. С увеличением количества углерода температуры M_n и M_k снижаются. Для эвтектоидной стали они составляют 240°C и -50°C соответственно. Если эвтектоидную сталь охладить до комнатной температуры, то кроме мартенсита в ней будет присутствовать некоторое количество остаточного аустенита.

В диапазоне температур от мартенситного до перлитного превращения происходит *промежуточное превращение*, и образуется структура, называемая *бейнит*. Промежуточное превращение сочетает черты диффузионного перлитного и бездиффузионного мартенситного превращений. Бейнит представляет собой структуру, состоящую из твердого раствора углерода в α -железе, менее пересыщенного углеродом, чем мартенсит, и мелких частиц цементита.

Отжиг стали. *Отжиг* заключается в нагреве заготовок или изделий до определенной температуры, выдержке их при данной температуре с последующим медленным охлаждением (со скоростью около $100-200^\circ\text{C}$ в час для углеродистых сталей и $30-100^\circ\text{C}$ в час для легированных сталей). При этом заготовки или изделия получают устойчивую структуру без остаточных напряжений. Цели отжига – снятие внутренних напряжений, устранение структурной и химической неоднородности, снижение твердости и улучшение обрабатываемости, подготовка к последующей операции термообработки. Отжиг бывает *полный, неполный, диффузионный, рекристаллизационный, низкий, изотермический и нормализационный*. Диффузионный, рекристаллизационный и низкий виды отжига относятся к отжигу первого рода, а остальные виды – к отжигу второго рода. Температуры нагрева стали для отжига второго рода связаны с положением линий диаграммы Fe-Fe₃C (критических точек). Низкая скорость охлаждения обычно достигается при остывании стали вместе с печью (рис. 4.22).

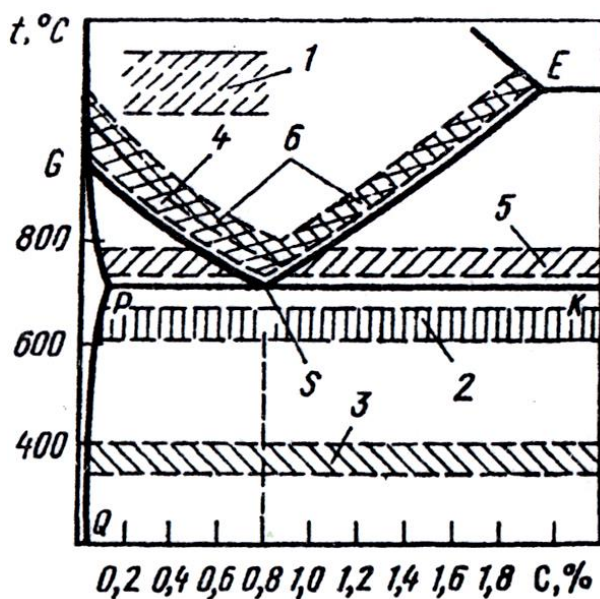


Рис. 4.22. Области нагрева стали при отжиге: 1 – диффузионном; 2 – рекристаллизационном; 3 – для снятия напряжений; 4 – полном; 5 – неполном; 6 – нормализационном

При *неполном отжиге* нагрев производится выше точки A_{c1} , но ниже A_{c3} . Он производится, если исходная структура не очень крупнозерниста или не надо изменить расположение ферритной (в доэвтектоидных сталях) или цементитной (в заэвтектоидных сталях) составляющей. При этом происходит лишь частичная перекристаллизация – только перлитной составляющей стали. Для доэвтектоидных сталей неполный отжиг применяют ограниченно, лишь для улучшения обрабатываемости резанием.

Диффузионный отжиг (гомогенизация) заключается в нагреве стали до 1000-1100 °С, выдержке (10-15 часов) при этой температуре и последующем медленном охлаждении. В результате диффузионного отжига происходит выравнивание неоднородности стали по химическому составу. Столь высокая температура необходима для ускорения диффузионных процессов. Благодаря высокой температуре нагрева и продолжительной выдержке получается крупнозернистая структура, которая может быть устранена последующим полным отжигом.

Рекристаллизационный отжиг предназначен для снятия наклепа и внутренних напряжений после холодной деформации и подготовки структуры к дальнейшему деформированию. Нагрев необходимо осуществлять выше температуры рекристаллизации, которая для железа составляет

Полный отжиг применяется для доэвтектоидных сталей. Нагрев стали для полного отжига осуществляется на 30-50 °С выше точки A_{c3} . При этом происходит полная перекристаллизация стали и уменьшение величины зерна. Исходная структура из крупных зерен феррита и перлита при нагреве превращается в аустенитную, а затем при медленном охлаждении в структуру из мелких зерен феррита и перлита. Повышение температуры нагрева привело бы к росту зерна. При полном отжиге снижается твердость и прочность стали, а пластичность повышается.

При *неполном отжиге* нагрев производится выше точки

450 °С. Обычно для повышения скорости рекристаллизационных процессов применяют значительно более высокие температуры, которые, однако, должны быть ниже критической точки A_{c1} . Поэтому температура нагрева для рекристаллизационного отжига стали составляет 650-700 °С. В результате рекристаллизационного отжига образуется однородная мелкозернистая структура с небольшой твердостью и значительной вязкостью.

Низкий отжиг применяется в тех случаях, когда структура стали удовлетворительна, и необходимо только снять внутренние напряжения, возникающие при кристаллизации или после механической обработки. В этом случае сталь нагревают значительно ниже точки A_{c1} (200-600 °С).

Нормализация или *нормализационный отжиг* состоит из нагрева стали на 30-50 °С выше точки A_{c3} для доэвтектоидных и A_{cm} для заэвтектоидных сталей (рис. 4.16), выдержки при этой температуре и последующего охлаждения на воздухе. Более быстрое охлаждение по сравнению с обычным отжигом приводит к более мелкодисперсной структуре. Нормализация – более дешевая термическая операция, чем отжиг, так как печи используют только для нагрева и выдержки. Для низкоуглеродистых сталей (до 0,3 % С) разница в свойствах между нормализованным и отожженным состоянием практически отсутствует, и эти стали лучше подвергать нормализации. При большем содержании углерода нормализованная сталь обладает большей твердостью и меньшей вязкостью, чем отожженная. Иногда нормализацию считают самостоятельной разновидностью термической обработки, а не видом отжига.

Закалка стали. *Закалка* заключается в нагреве стали до температур, превышающих температуру фазовых превращений, выдержке при этой температуре и последующем быстром охлаждении. Цель закалки – повышение твердости и прочности стали. При этом снижается вязкость и пластичность.



Рис. 4.23. Структура мартенсита закаленной стали 45

Обычно в результате закалки образуется мартенситная структура (рис. 4.23). Поэтому охлаждать сталь следует с такой скоростью, чтобы кривая охлаждения не пересекала С-образные кривые диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 4.18). Наименьшая скорость закалки, при которой образуется мартенсит, называется *критической скоростью закатки*. Для достижения высокой скорости охлаждения закаливаемые детали из углеродистой стали погружают в воду. Легированные стали охлаждают в

минеральном масле, так как у них критическая скорость закалки значительно ниже.

Температура нагрева при закалке стали зависит от ее химического состава.

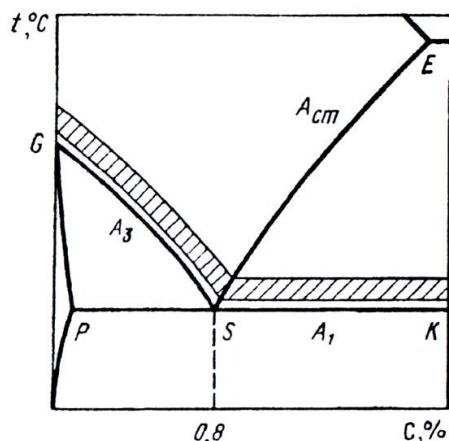


Рис. 4.24. Области нагрева стали при закалке

В доэвтектоидных сталях нагрев производится на 30-50 °С выше точек A_{c3} (рис. 4.24). При этом образуется аустенит, который при последующем охлаждении со скоростью выше критической превращается в мартенсит. Такую закалку называют полной. Для закалки заэвтектоидной стали наилучшей температурой является нагрев на 30-50 °С выше A_{c1} . Такую закалку называют неполной. В этом случае в стали сохраняется цементит и при нагреве, и при охлаждении, а это способствует повышению твердости, так как твердость цементита больше, чем твердость мартенсита. Нагрев заэвтектоидной

стали до температуры выше точек A_{cm} (полная закалка) является излишним, так как твердость при этом меньше, чем при закалке выше A_{c1} . Кроме того, при охлаждении после нагрева до более высоких температур могут возникнуть большие внутренние напряжения.

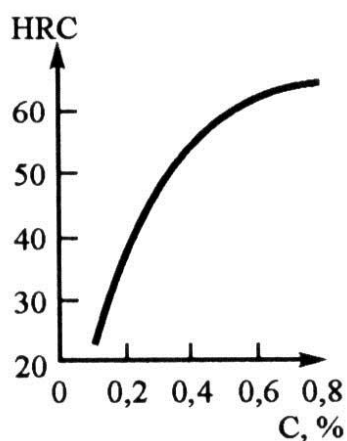


Рис. 4.25. Изменение твердости мартенсита с увеличением количества углерода в стали

Способность стали закаливаться на мартенсит называется *закаливаемостью*. Она характеризуется значением твердости, приобретаемой сталью после закалки, и зависит от содержания углерода (рис. 4.25). Стали с низким содержанием углерода (до 0,3 %) практически не закаливаются, и закалка для них не применяется.

По способу охлаждения различают виды закалки: в одной среде, в двух средах (прерывистая), ступенчатая и изотермическая. *Закалка в одной среде* проще и применяется чаще для изделий несложной формы. Недостаток закалки в одной среде – возникновение значительных внутренних напряжений. При *прерывистой* закалке изделие охлаждают сначала в одной среде (например, в воде до 300-400 °С), а затем в масле или на воздухе. При этом внутренние напряжения меньше, но возникают затруднения при определении времени выдержки в первом охладителе. *Ступенчатую*

закалку производят путем быстрого охлаждения в соляной ванне, температура которой немного выше 240-250 °С (что соответствует началу мартенситного превращения), затем дают выдержку при данной температуре и окончательно охлаждают на воздухе. Короткая остановка при охлаждении способствует выравниванию температуры по всему сечению детали, что уменьшает напряжения, возникающие в процессе закалки. Ступенчатую закалку применяют для деталей из углеродистой стали небольшого сечения.

При *изотермической* закалке, как и при ступенчатой, детали охлаждаются в среде, нагретой выше температуры начала мартенситного превращения, однако выдержка при этой температуре продолжительная – до полного распада аустенита. Получается структура не мартенсита, а близкого по твердости, но более пластичного бейнита. Дальнейшее охлаждение производят на воздухе. Преимущества изотермической закалки заключаются в большей вязкости, отсутствии трещин, минимальном короблении. Изотермическую закалку применяют для изделий сложной формы.

Отпуск стали – это вид термической обработки, следующий за закалкой и заключающийся в нагреве стали до определенной температуры (ниже точки A_{c1}), выдержке и охлаждении. Цель отпуска – получение более равновесной по сравнению с мартенситом структуры, снятие внутренних напряжений, повышение вязкости и пластичности (рис. 4.26).

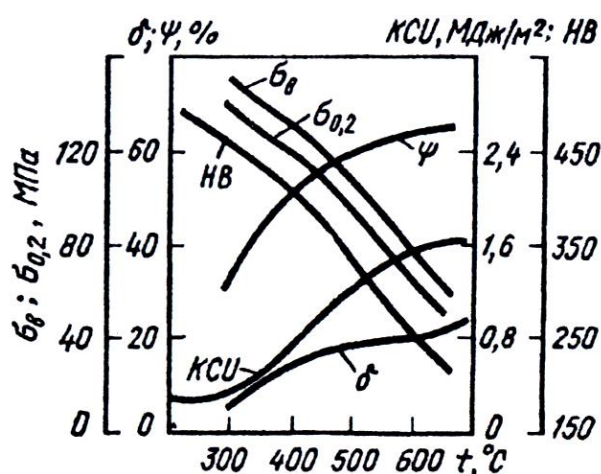


Рис. 4.26. Изменение механических свойств закаленной стали 40 при отпуске

Основной процесс, происходящий при отпуске, – распад мартенсита, т.е. выделение углерода из пересыщенного твердого раствора в виде карбида железа.

Температуру отпуска обычно выбирают в зависимости от требуемой твердости. В этом случае изделие закалывают на максимальную твердость, а затем отпуском твердость снижают до требуемой.



Рис. 4.25. Режущий инструмент после неполной закалки с низким отпуском

Различают низкий, средний и высокий отпуск. *Низкий отпуск* проводится при температуре 150-200 °С. Образуется структура мартенсита отпуска. Мартенсит отпуска отличается от мартенсита закалки наличием мелкодисперсных частиц карбидов и меньшей степенью тетрагональности кристаллической решетки. В результате снимаются внутренние напряжения, происходит некоторое увеличение пластичности и вязкости без заметного снижения твердости и износостойкости. Низкому отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент (рис. 4.25), а также машиностроительные детали, которые должны обладать высокой твердостью и износостойкостью.

При *среднем отпуске* производится нагрев до 350-450 °С. При этом происходит некоторое снижение твердости при значительном увеличении предела упругости и улучшении сопротивляемости действию ударных нагрузок. Структура стали представляет собой тростит отпуска, который имеет зернистое, а не пластинчатое строение. Применяется для пружин, рессор, ударного инструмента (рис. 4.26).



Рис. 4.26. Пружины и другие изделия с повышенной упругостью после закалки и среднего отпуска

Высокий отпуск проводится при 550-650°С. В результате твердость и прочность снижаются значительно, но сильно возрастают вязкость и пластичность и получается оптимальное для конструкционных сталей со-

четание механических свойств. Структура стали – сорбит отпуска с зернистым строением цементита. Применяется для деталей, подвергающихся действию высоких нагрузок (рис. 4.27).



Рис. 4.27. Детали машин после закалки и высокого отпуска

Термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска, называется *улучшением*. Она является основным видом обработки конструкционных сталей.

Термообработка дуралюмина. Широкое применение в технике

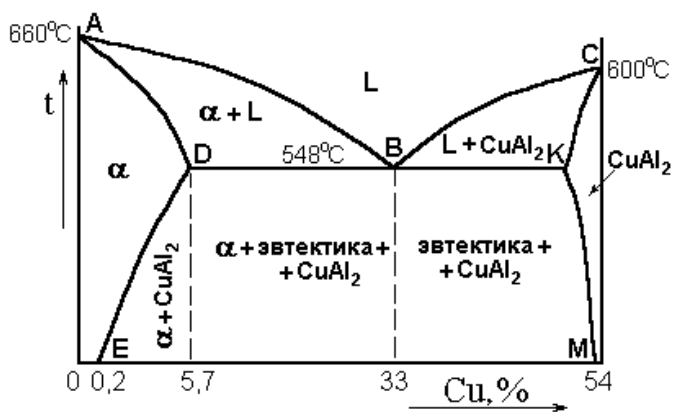


Рис. 4.28. Диаграмма состояния системы алюминий-медь

получили деформируемые алюминиевые сплавы – *дуралюмины*. Это сплавы с содержанием 3-5 % меди в алюминии. Поэтому для описания процессов термообработки дуралюмина, рассмотрим диаграмму состояния системы алюминий-медь (рис. 4.28). Это диаграмма с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Растворимость

меди в алюминии достигает 5,7 % при 548 °С. С понижением температуры растворимость меди быстро уменьшается до 0,2 % при 20 °С. В области, ограниченной линиями ADE, существует твердый раствор меди в алюминии – α . В области, ограниченной линиями СКМ, существует

химическое соединение – CuAl_2 . Линия DE на диаграмме показывает предельную растворимость меди в твердом растворе α в зависимости от температуры. С понижением температуры растворимость меди уменьшается с 5,7 % до 0,2 %. Поэтому при охлаждении доэвтектических сплавов ниже EDB из твердого раствора α выделяются избыточные атомы меди с образованием частиц CuAl_2 .

Отжиг дуралюмина заключается в нагреве сплава до 550 °С, выдержке и охлаждении вместе с печью. В отожженном – равновесном – состоянии структура дуралюмина состоит из зерен твердого раствора меди в алюминии и частиц соединения CuAl_2 . При этом частицы CuAl_2 крупные (рис. 4.29а). Такая структура обеспечивает сплаву хорошую пластичность ($\delta = 18\text{-}20\%$) при относительно невысоких значениях прочности ($\sigma_{\text{в}} = 200\text{-}220$ МПа) и твердости.

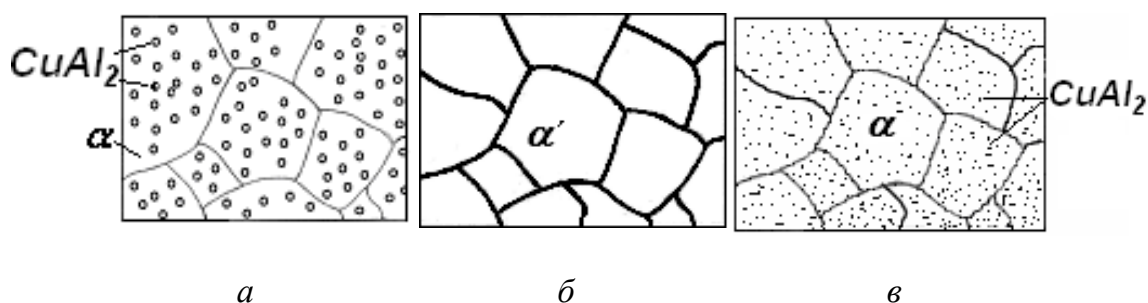


Рис. 4.29. Схемы строения дуралюмина: а – в отожженном состоянии; б – после закалки; в – после старения

Если отожженный дуралюмин вновь нагреть до температуры однофазного состояния – 550°С, то при этом частицы CuAl_2 диссоциируют и растворяются в твердом растворе α . Когда этот процесс завершится, структура станет однофазной, и вся медь растворится в твердом растворе. Если затем сплав быстро охладить в воду – произвести *закалку*, то медь не успеет выделиться из твердого раствора и сохранится в нем после охлаждения. В результате такой обработки сформируется пересыщенный твердый раствор меди в алюминии – α' (рис. 4.29б).

В результате закалки формируется твердый раствор замещения, и упрочнение происходит, в основном, за счет искажений кристаллической решетки, обусловленных разными размерами атомов алюминия и меди. Торможение дислокаций за счет этих искажений невелико. Поэтому после закалки значительного упрочнения дуралюмина не происходит – его прочность составляет $\sigma_{\text{в}} = 250\text{-}270$ МПа, однако пластичность возрастает до $\delta = 20\text{-}24\%$, что позволяет пластически деформировать сплав в этом состоянии.

Для более эффективного упрочнения алюминиевых сплавов их необходимо после закалки подвергать *старению*. В процессе старения происходят следующие изменения в структуре закаленного сплава. Поскольку пересыщенный твердый раствор α' в закаленном сплаве – структура неравновесная и неустойчивая, при последующей выдержке сплава в течение определенного времени в этом твердом растворе происходит диффузионное перераспределение атомов меди. В результате в отдельных участках сплава образуются обогащенные медью зоны. Постепенно в этих зонах при возрастании концентрации меди формируются очень мелкие (дисперсные) частицы CuAl_2 . Размер частиц составляет не более 30 нм (рис. 4.29в).

Формирование в структуре сплава зон с высокой концентрацией меди и дисперсных частиц химического соединения CuAl_2 включает механизм дисперсионного упрочнения и приводит к значительному повышению значений прочности ($\sigma_{\text{в}} = 400\text{-}650$ МПа) и твердости, при незначительном снижении пластичности ($\delta = 10\text{-}18$ %).

Старение может быть *естественным* – длительная выдержка (4-6 суток) при комнатной температуре или *искусственным* – более короткая выдержка (несколько часов или несколько десятков минут в зависимости от марки сплава) при повышенной температуре (100-180 °С). При увеличении температуры и продолжительности искусственного старения дисперсные частицы начинают интенсивно коагулировать и укрупняться. При этом расстояние между ними увеличивается, что облегчает прохождение дислокаций между частицами и приводит к снижению прочности сплава. Поэтому для каждого сплава необходимо выбирать оптимальный режим старения, который должен обеспечивать сохранение в структуре дисперсной упрочняющей фазы CuAl_2 .

5. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Главным отличием неметаллических материалов от металлических является атомное или молекулярное строение, имеющее ковалентные связи. Подобное строение исключает наличие в объеме изделия электронного газа, что обеспечивает низкие тепло- и электропроводящие свойства. Другим, не менее важным, отличием является существенно меньшая их плотность. Так, плотность пластмасс ниже плотности алюминия в два раза.

Происхождение неметаллических материалов и связанные с ним условия их получения и переработки во многом определяют технико-экономические показатели и возможности их практического использования. По происхождению они подразделяются на природные, искусственные и синтетические.

К *природным* неметаллическим материалам относятся древесина, растительные волокна, натуральный каучук, сырые кожи, ископаемые материалы (асбест, слюда, природные графиты, алмазы, битумы и др.).

Искусственные неметаллические материалы, как правило, получают из природных полимеров путем соответствующей химической обработки. Наиболее распространенными представителями этой группы материалов являются различные модификации древесной и хлопковой целлюлозы, бумажные и текстильные материалы, пластмассы на основе сложных и простых эфиров целлюлозы, полимерные белковые соединения (казеин, столярный клей), некоторые разновидности асботехнических и углеграфитовых материалов.

Синтетические неметаллические материалы в большинстве случаев получают из более простых (обычно низкомолекулярных) соединений в процессе химических, физико-химических и термохимических превращений. К этой группе относятся синтетические полимеры и эластомеры, лежащие в основе синтетических волокон, пластмасс, резин, клеев, лаков, герметиков и т.д., искусственные алмазы и графиты, бескислородная керамика, силикатные стекла, ситаллы и др.

На свойства неметаллических материалов существенное влияние оказывают их структура (аморфная или кристаллическая) и особенности физического строения. Наличие кристаллической структуры, обусловленной упорядоченным расположением элементарных структурных единиц относительно друг друга, способствует увеличению плотности и повышению устойчивости к атмосферным воздействиям и агрессивным средам, а также определяет более четкий характер тем-

пературных интервалов фазовых превращений. Большинство неметаллических материалов имеет аморфную структуру.

5.1. Пластмассы

Пластмассы – это так называемые пластические массы, получаемые на основе природных и синтетических высокомолекулярных соединений (*полимеров*), которые способны под воздействием теплоты и давления принимать и сохранять заданную форму. Полимеры состоят из многочисленных элементарных звеньев одинаковой структуры – *мономеров*. Химический состав полимера выражают этим структурным звеном, а число звеньев n в макромолекулярной цепи называют *степенью полимеризации*. Например, молекула полиэтилена состоит из многократно повторяющегося звена C_2H_4 и может быть представлена в виде схемы (рис. 5.1).

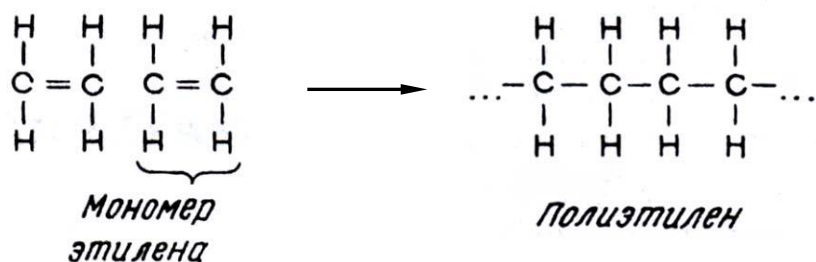


Рис. 5.1. Схема полимеризации полиэтилена

В зависимости от числа звеньев в молекуле изменяются агрегатное состояние и свойства вещества. При $n = 5$ это жидкость, при $n = 50...70$ – вязкая жидкость (смазка), при $n = 100...120$ – твердое вещество (парафин), при $n = 1500...2000$ – высокомолекулярное соединение (полиэтилен). Макромолекулы полимера, имея одинаковый химический состав, могут значительно различаться размерами, а следовательно и свойствами.

Полимерные макромолекулы представляют собой длинные цепочки, состоящие из большого количества отдельных звеньев. Поперечное сечение цепи составляет несколько нанометров, а длина – до нескольких тысяч нанометров, поэтому макромолекулам полимера свойственна большая гибкость. Это одна из отличительных особенностей полимеров. Полимеры характеризуются прочными химическими связями вдоль цепи в макромолекулах и относительно слабыми – между ними, за исключением пространственно сшитых полимеров.

По форме макромолекул полимеры делятся на *линейные, разветвленные, лестничные и пространственные*. Линейные макромолекулы

(рис. 5.2а) представляют собой длинные зигзагообразные или закрученные в спираль цепочки с высокой прочностью химических связей вдоль цепи и слабыми межмолекулярными связями. Разветвленные макромолекулы (рис. 5.2б) характеризуются наличием боковых ответвлений от основной молекулярной цепи. Лестничный полимер имеет макромолекулу, состоящую из двух молекулярных цепей, соединенных химическими связями (рис. 5.2в). Пространственные (сетчатые) полимеры (рис. 5.2г) образуются при соединении молекулярных цепей между собой в поперечном направлении. В результате образуется пространственная сетчатая структура с различной частотой сетки.

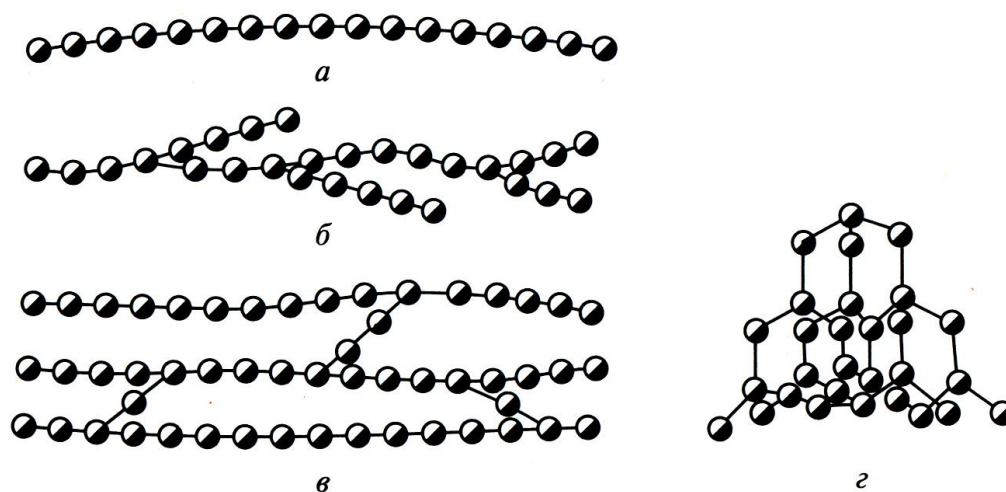


Рис 5.2. Формы макромолекул полимеров: а – линейная, б – разветвленная, в – лестничная, г – сетчатая, пространственная

В зависимости от упаковки молекул полимеры могут одновременно иметь и кристаллическое, и аморфное строение. В отличие от металлов, кристалличность полимеров – это упорядоченное (параллельное) расположение звеньев и цепей, которое обычно составляет 50%, но может достигать 90%. Соотношение кристаллической и аморфной фаз называется *степенью кристаллизации*. Оно изменяется в зависимости от изменения скорости охлаждения и вытяжки. Аморфные материалы обычно хрупки, а кристалличность придает полимеру повышенную теплостойкость, жесткость и прочность. К кристаллизующимся полимерам относятся полиэтилен, полипропилен, полиамид и др.

По поведению при нагреве все полимеры делятся на *термопластичные* и *терморезактивные*. Термопластичные полимеры при нагреве размягчаются, а при охлаждении затвердевают. При повторном нагревании и охлаждении вновь происходит размягчение и затвердевание. Поэтому термопластичные полимеры можно перерабатывать в изделия

неоднократно. Термопластичные полимеры имеют макромолекулы линейной или разветвленной структуры. Термореактивные полимеры первоначально имеют линейную структуру и при нагревании размягчаются. При высокой температуре происходит соединение макромолекул со специальными отвердителями (сшивающими агентами) в сетчатую пространственную структуру (рис. 5.2г). За счет этого полимер затвердевает и при повторном нагревании остается твердым. Поэтому термореактивные полимеры не могут быть подвергнуты повторной переработке (рис. 5.3).



Рис. 5.3. Реакция отверждения эпоксидной смолы

Термопластичные полимеры удобны в переработке, обладают большой упругостью и малой хрупкостью. Термореактивные полимеры хрупки. В ненаполненном виде не применяются, а используются в качестве связующих в композиционных материалах.

В зависимости от температуры полимерные материалы могут находиться в трех физических состояниях: стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем.

Если полимер находится в стеклообразном состоянии (при температуре ниже температуры стеклования), он деформируется, как обычные упругие твердые тела. В высокоэластическом состоянии (при температуре выше температуры стеклования) характер поведения под нагрузкой зависит от строения и фазового состава полимера (рис. 5.4).

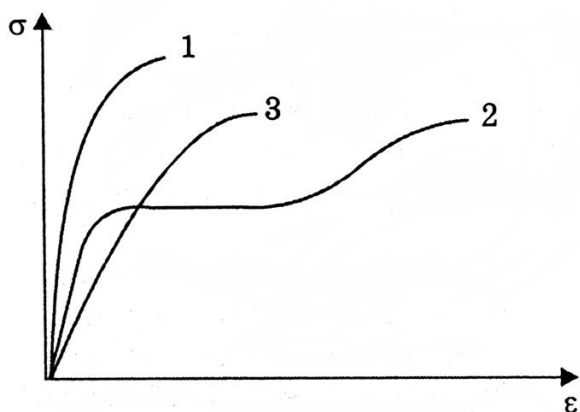


Рис. 5.4. Диаграммы растяжения полимеров, находящихся в высокоэластическом состоянии:

1 – аморфного термопласта;
2 – кристаллического термопласта; 3 – реактопласта

Полимеры с аморфной структурой и реактопласты хрупкие, но имеют довольно высокое значение прочности. Кристаллические термопласты пластичны и при деформации с определенной нагрузкой на диаграмме растяжения наблюдается рост деформации при незначительном изменении нагрузки.

Характер диаграмм $\sigma - \epsilon$ и предел прочности в значительной мере зависят от температуры и скорости деформации, так как температура оказывает влияние на силы межмолекулярного взаимодействия, а скорость деформирования определяет возможные структурные перестройки при приложении нагрузки. Так, при деформации кристаллического термопласта при низкой температуре или с высокой скоростью, его кривая имеет вид кривой деформации аморфного термопласта (см. рис 5.4).

При переработке, эксплуатации и хранении полимеры подвергаются воздействию теплоты, света, проникающей радиации, кислорода, влаги, агрессивных химических соединений, механических нагрузок, что создает условия для инициирования и развития деструкции и сшивания молекул. Самопроизвольное необратимое изменение важнейших характеристик, происходящее в результате химических и физических процессов, развивающихся в полимере при эксплуатации и хранении называется *старением полимеров*. Практически все полимеры склонны к старению. При старении полимеры размягчаются или, наоборот, повышается их твердость и хрупкость и теряется эластичность. Для замедления процесса старения в полимеры добавляются *стабилизаторы* – различные органические вещества, ослабляющие действия факторов, способствующих старению.

Наиболее широкое применение в различных отраслях промышленности нашли термопластичные полимеры – полиофелины, полиамиды, поливинилхлорид, фторопласты, полиуретаны, а также терморреактив-

ные – феноло-формальдегидные, эпоксидные, полиэфирные и полиамидные смолы.

Пластмассы состоят из нескольких полимеров, основной из которых называется *связующим* веществом. Такие простые пластмассы, как полиэтилен, вообще состоят из одного связующего вещества. Кроме связующего вещества в состав пластмасс могут входить: *наполнители* (твердые материалы органического и неорганического происхождения) для повышения прочности, твердости, теплостойкости и придания специальных свойств; *пластификаторы* (олеиновая кислота, стеарин, дибутилфталат и др.) для повышения пластичности, что необходимо при изготовлении изделий из пластмасс; *отвердители*, ускоряющие переход пластмасс в неплавкое, твердое и нерастворимое состояние; *стабилизаторы*, предотвращающие или замедляющие процесс старения; *красители*.

По виду наполнителя пластмассы делятся на порошковые, волокнистые, слоистые, газонаполненные и пластмассы без наполнителя.

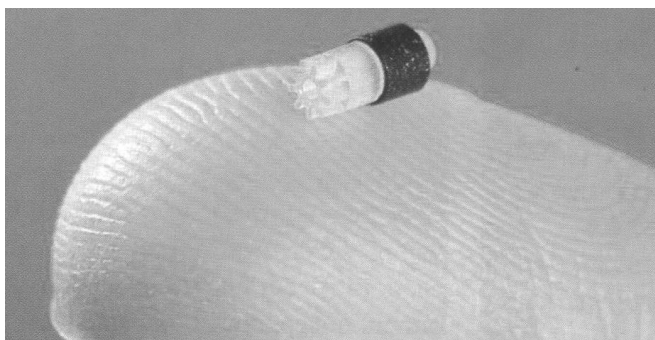


Рис. 5.5. Фотография миниатюрного полимерного постоянного магнита на кончике пальца

По способу переработки в изделия пластмассы подразделяются на литьевые и прессовочные.

Современное производство не может обойтись без пластмасс (рис. 5.5), а создание композитов на их основе дает возможность снизить их недостатки и сформировать уникальные свойства.

Рассмотрим наиболее

важные пластмассы.

Полиэтилен $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ – продукт полимеризации бесцветного газа – этилена. Полиэтилен – один из самых легких материалов – имеет высокую эластичность, отличные электроизоляционные свойства, химически стоек, водонепроницаем, морозостоек до -70°C , пластичен, недорог, технологичен. Недостатки – склонность к старению и невысокая теплостойкость (до $+70^\circ\text{C}$). Для защиты от старения в полиэтилен вводятся стабилизаторы (2-3 % сажи). Используется для изготовления пленки, изоляции проводов, изготовления коррозионно-стойких труб, уплотнительных деталей. Применяется для покрытия металлов с целью защиты их от коррозии. Занимает первое место в общем объеме мирового производства пластмасс.

Полипропилен $(-\text{CH}_2-\text{CHC}_6\text{H}_5-)_n$ также производится из этилена. По свойствам аналогичен полиэтилену, но более теплостоек (до $+150^\circ\text{C}$), имеет более высокую прочность, меньше склонен к старению. Применяется для изготовления деталей в автомобилестроении, химическом машиностроении, пленки, волокон, труб для горячей воды, электроизоляционных деталей (рис. 5.6).

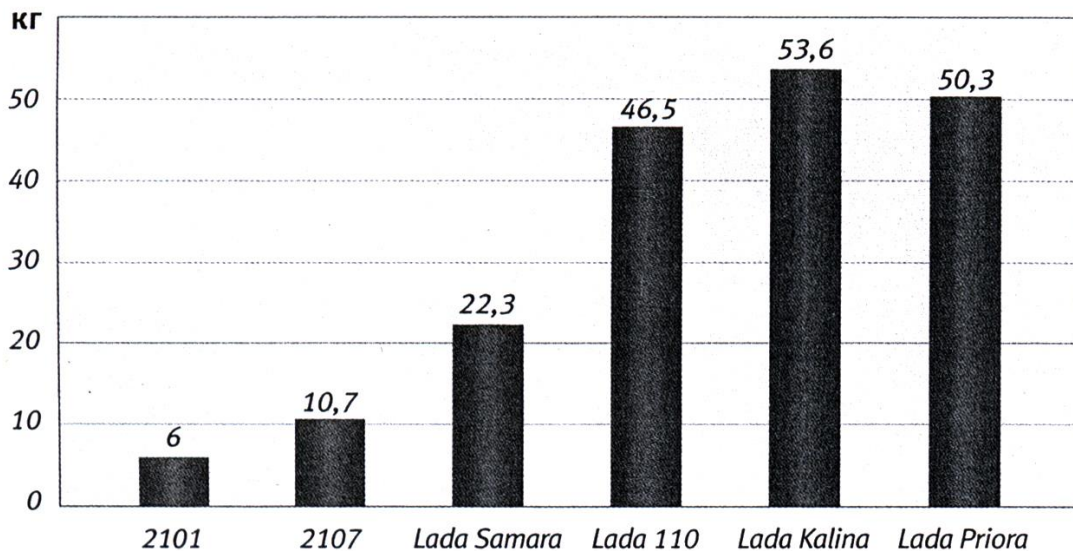


Рис. 5.6. Динамика применения полипропилена в автомобилях Lada и фотография гранул полипропилена с деталями корпуса автомобиля Lada Kalina

Полистирол $(-\text{CH}_2-\text{CHC}_6\text{H}_5-)_n$ – продукт полимеризации стирола, твердый, жесткий, прозрачный полимер. Имеет очень хорошие электроизоляционные свойства. Химически стоек, водостоек, хорошо обрабатывается механически, более стоек к воздействию радиации по сравнению с другими термопластами. Его недостатки – низкая теплостойкость (до $+65^\circ\text{C}$), склонность к старению и растрескиванию. Используется в электротехнической, радиотехнической и химической промышленности.

Органическое стекло – прозрачный термопластичный материал на основе полиакриловой смолы. Отличается высокой оптической прозрачностью, пропускает ультрафиолетовые лучи, имеет высокий коэффициент преломления, в 2 раза легче минеральных стекол, обладает химической стойкостью в среде разбавленных растворов кислот и щелочей, углеводородных топлив и смазок. Недостатки – низкая твердость. Выпускается в виде листов толщиной до 25 мм. Используется для остекления в автомобиле- и самолетостроении, для прозрачных деталей в приборостроении.

Поликарбонат – термопластический полимер на основе дифенилопропана и фостена. Характеризуется низкой водопоглощаемостью и газопроницаемостью, высокой жесткостью, тепло- и химической стойкостью, физиологически безвреден, бесцветен, прозрачен, хорошо окрашивается. Стоек к световому старению. Это один из наиболее ударопрочных термопластов, что позволяет использовать его в качестве конструкционного материала, заменяющего металл. Из поликарбоната изготавливают шестерни, подшипники, корпуса и др. В современном автомобилестроении из поликарбоната изготавливают окна и крыши автомобилей.

Фторопласты – производные этилена, в которых все атомы водорода заменены галогенами. Они имеют наибольшую термическую и химическую стойкость из всех термопластичных полимеров. Фтороплас -4 ($-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$)_n, называемый также тетрафторэтилен (тефлон), имеет высокую плотность (2,2 г/см³), водостоек, не горит, не растворяется в обычных растворителях, обладает электроизоляционными и антифрикционными свойствами. По химической стойкости превосходит все известные материалы. Выдерживает температуру от -269 до +260 °С. Недостаток – трудность переработки в изделия. Применяется для изготовления изделий, работающих в агрессивных средах, при высокой температуре, для антифрикционных покрытий на металлах, прокладок, электроизоляции и др.

Полиуретаны — высокомолекулярные соединения, содержащие уретановую группу $-\text{NH}-\text{COO}-$. По свойствам они близки к полиамидам, но обладают более высокой стойкостью к действию воды и окислителей, а так же превосходят их по диэлектрическим свойствам. Они характеризуются эластичностью, морозостойкостью до -70 °С. Они применяются для изготовления пленок, волокон, изоляции, полиуретановых каучуков.

Эпоксидные смолы представляют собой вязкие низкомолекулярные жидкости, молекулы которых содержат эпоксидную группу. При добавке отвердителей происходит полимеризация эпоксидных смол, они за-

твердевают и приобретают пространственное сетчатое строение. Отвержденные эпоксидные смолы весьма прочны, усадка при отверждении достаточно мала – около 1 %. Эпоксидные смолы проявляют высокую адгезию как к наполнителям, так и к различным конструкционным материалам (металлам, стеклу, керамике), что позволяет использовать их в качестве клеев.



Рис.5.7. Стекловолокно часто используется в качестве наполнителя в композиционных материалах

Стекловолокниты имеют в качестве наполнителя стекловолокно. Неориентированные стекловолокниты имеют в качестве наполнителя короткое стекловолокно (рис. 5.7), что позволяет изготавливать детали сложной формы с металлической арматурой. Ориентированные стекловолокниты (стеклопластики) имеют в качестве наполнителя длинные стеклянные волокна, уложенные закономерно отдельными прядями, что придает стеклопластику более высокую прочность. Они не горючи, обладают химической стойкостью, выдерживают

температуру до +250 °С. Применяются для изготовления деталей, обладающих повышенной прочностью, а также для изготовления деталей высокой точности.

Газонаполненные пластмассы представляют собой материалы на основе синтетических смол, содержащие газовые включения. В *пенопластах* (пенополистирол, пенополивинилхлорид) поры, заполненные газом, не соединяются друг с другом и образуют замкнутые объемы. Они представляют собой жесткие материалы, отличающиеся малой плотностью (0,02-0,2 г/см³), высокими тепло-, звуко- и электроизоляционными свойствами, очень хорошей плавучестью, водостойкостью. Недостаток пенопластов – низкая прочность. Используются для теплоизоляции и звукоизоляции, изготовления непотопляемых плавучих средств, в качестве легкого заполнителя различных конструкций. Мягкие виды пенопластов используются для изготовления мебели, амортизаторов и т.п.

Поропласты (губчатые материалы) — это газонаполненные пластмассы, поры которых сообщаются между собой. Их плотность составляет 0,02-0,5 г/см³. Они представляют собой мягкие эластичные материалы, обладающие водопоглощением. Получают поропласты путем вве-

дения в состав композиций веществ, которые вымываются водой или вскипают при нагреве.

Интегральные пенопласты состоят из легкой пористой микроячеистой (0,02-2 мм) сердцевины – пенопласта, постепенно переходящей в монолитную поверхностную корку (рис. 5.8).

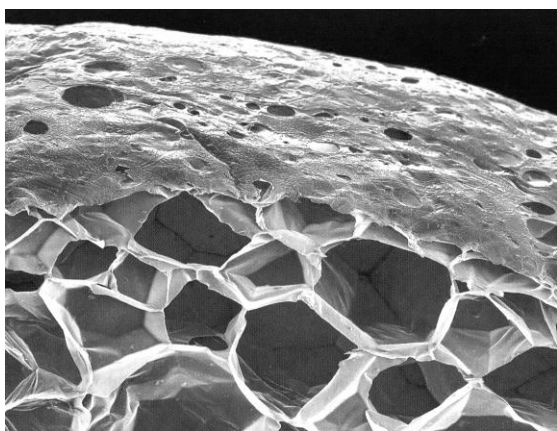


Рис. 5.8. РЭМ изображение излома интегрального пенопласта (×1000)

Интегральные пенопласты обладают высокими механическими свойствами, т.к. поверхностная корка придает изделиям стойкость к механическим нагрузкам, а пористая сердцевина – легкость. По удельной ударной механической прочности и удельной жесткости при изгибе могут превосходить монолитные аналоги, ряд металлов и древесину. Благодаря своим

упругим свойствам эти материалы применяются для производства энергопоглощающих, амортизирующих и уплотнительных изделий.

5.2. Керамические материалы

Под *керамикой* понимаются поликристаллические материалы, получаемые спеканием неметаллических порошков природного или искусственного происхождения. Керамика относится к основным материалам, оказывающим определяющее влияние на уровень и конкурентоспособность промышленной продукции. В данное время керамика является третьим промышленным материалом после металлов и пластмасс, и первый конкурент металлических сплавов для использования при высоких температурах.

Керамические материалы выгодно отличаются от металлических и полимерных следующими свойствами: многофункциональностью, доступностью сырья, низкой энергоемкостью производства, высокой коррозионной стойкостью и устойчивостью к радиационному воздействию, биологической совместимостью, низкой плотностью.

Однако керамике присущ и ряд существенных недостатков: чувствительность к термоударам (особенно переохлаждению), хрупкость, низкое временное сопротивление, сложность механической обработки.

Эти материалы перспективны для инструментов, деталей двигателей внутреннего сгорания, фильтров, мембран с различной пропускной

способностью, элементов искусственных органов, износостойких покрытий, нагревательных элементов и др.

По структуре керамика может быть *аморфная и кристаллическая*. *Кристаллическая фаза* – основа керамики. *Аморфная фаза* представляет собой прослойку стекловидных веществ, которая облегчает процесс изготовления материала и изделий и служит связкой для частиц кристаллической фазы. Количество аморфной фазы может составлять до 40 %.

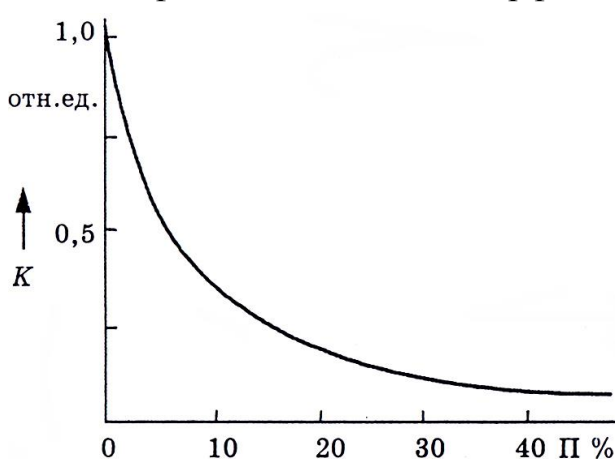


Рис. 5.9. Влияние пористости керамики (П) на ее прочность (К, в относительных единицах).

В некоторых видах керамики, полученных из чистых веществ, эта фаза может отсутствовать.

При отжиге в керамике образуется газовая фаза. В зависимости от формы пор и количества газовой фазы, керамику подразделяют на *плотную, без открытых пор* и *пористую*. Наличие пор обуславливает снижение прочности керамики (рис. 5.9). Поэтому для конструкционной керамики пористость в основном нежелательна.

По составу керамику можно подразделить на *кислородную*, состоящую из оксидов металлов и неметаллических элементов (бериллия, магния, алюминия, кремния, титана, циркония) и *бескислородную* – нитридную, карбидную, боридную и др.

Корундовая керамика на основе Al_2O_3 получила наибольшее распространение. Характеризуется температурой плавления $2050\text{ }^{\circ}C$, плотностью $3,97\text{ г/см}^3$, высокой прочностью, теплостойкостью, химической стойкостью, износостойкостью, диэлектрическими свойствами. Сырьем для получения чистого оксида алюминия являются бокситы, содержащие от 50 до 100 % Al_2O_3 . Эта керамика широко применяется для изготовления инструмента, деталей двигателей внутреннего сгорания, высокотемпературных печей, керамических подшипников, тиглей для плавки металлов, сопел, в приборостроении и электротехнике.

Керамика из оксида циркония ZrO_2 , характеризуется низкой теплопроводностью, высокой прочностью, высокой температурой плавления $2677\text{ }^{\circ}C$, плотностью $5,56\text{ г/см}^3$. Поэтому она используется для работы при высоких температурах до $2200\text{ }^{\circ}C$. Из нее изготавливают тигли для плавки металлов, тепловую изоляцию печей и реакторов, теплозащит-

ные покрытия на металлах, детали двигателей внутреннего сгорания. Недостатками этой керамики является низкая стойкость к резкой смене температур и высокая стоимость.

Керамика из оксида магния MgO имеет высокую температуру плавления 2800 °С, плотность 3,58 г/см³, обладает стойкостью к действию основных шлаков различных металлов. Поэтому применяется для изготовления тиглей и футеровки печей. Недостаток оксида магния – летучесть при высоких температурах, низкая термическая стойкость.

Керамика из оксида бериллия BeO характеризуется высокой теплопроводностью и термостойкостью, температурой плавления 2580 °С, плотностью 3,03 г/см³, низкой прочностью, хорошо рассеивает ионизирующее излучение и замедляет тепловые нейтроны. Поэтому используется в конструкции ядерных реакторов и для изготовления тиглей для плавки металлов. Недостатками этой керамики является высокая стоимость и токсичность.

Карбид кремния SiC обладает высокой твердостью, прочностью, химической стойкостью, жаростойкостью до 1800 °С, температурой плавления 2600 °С, плотностью 3,2 г/см³. Применяется в качестве абразивного материала, защитного покрытия графита, деталей двигателей внутреннего сгорания, нагревательных стержней (рис. 5.10).

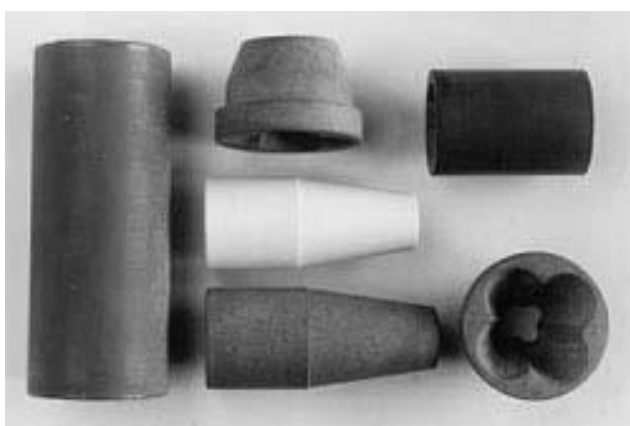


Рис. 5.10. Сопла для газосварочных аппаратов из керамики на основе карбида кремния

Нитрид кремния Si₃N₄ характеризуется высокой прочностью, жаропрочностью, износостойкостью, жаростойкостью до 1800°С, плотностью 3,2 г/см³. Применяется для деталей двигателей внутреннего сгорания.

Бориды тугоплавких металлов (TiB₂, ZrB₂) характеризуются высокой твердостью, износостойкостью, обладают металлическими свойствами, очень высокой температурой плавления. Их используют в качестве износостойких и защитных покрытий. ZrB₂ используют для изготовления термопар, работающих в среде расплавленных металлов.

Одним из основных недостатков керамики является ее хрупкость, так как для распространения трещины в керамическом материале расходуется энергии в тысячу раз меньше, чем в металлах. Снижения хрупкости добиваются путем введением в состав диоксида циркония, армирования керамики волокнами из хрома, никеля, ниобия, вольфрама. Применяется также специальная технология формирования в структуре микротрещин (рис. 5.11).

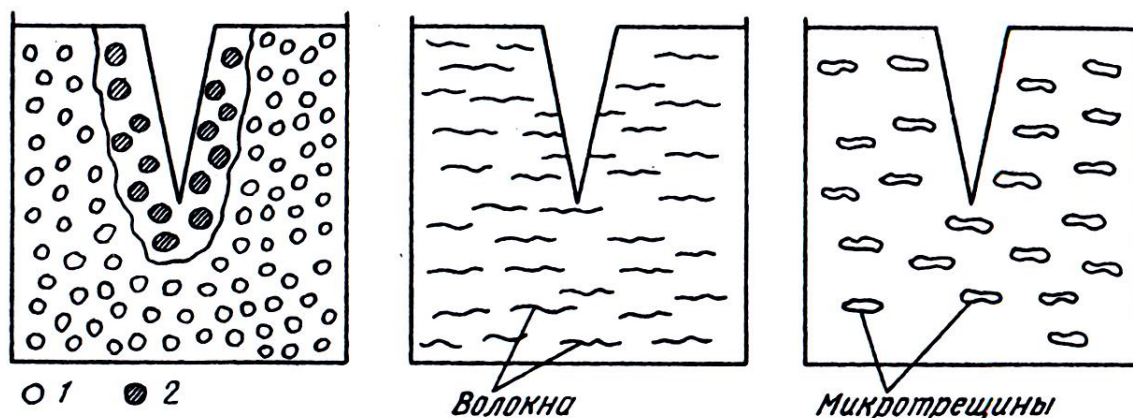


Рис. 5.11. Схема упрочнения конструкционной керамики включениями ZrO_2 (а), волокнами (б) и мелкими трещинами (в): 1 – тетрагональный ZrO_2 ; 2 – моноклинный ZrO_2

Первый способ основан на том, что в диоксиде циркония ZrO_2 под давлением происходит полиморфное превращение тетрагональной кристаллической структуры в моноклинную, имеющую на 3-5% больший объем. Расширяясь, зерна ZrO_2 сжимают трещину, и она теряет способность к распространению. Второй способ состоит в создании композиционного материала. Введенные в керамику волокна встречают распространяющуюся трещину и останавливают ее рост. Третий способ состоит в том, что с помощью специальных технологий весь керамический материал пронизывают микротрещинами. При встрече основной трещины с микротрещиной угол в острие трещины возрастает, происходит затупление трещины, и она дальше не распространяется.

Керамика в двигателях. Конструкционная керамика допускает применение более высоких температур по сравнению с металлом и поэтому является перспективным материалом для двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей. Помимо более высокого КПД двигателей за счет повышения рабочей температуры преимуществом керамики является низкая плотность и теплопроводность, повышенная термо- и износостойкость. Кроме того, при ее использовании снижаются или отпадают расходы на систему охлаждения.

Вместе с тем следует отметить, что в технологии изготовления керамических двигателей остается ряд нерешенных проблем. К ним, прежде всего, относятся проблемы обеспечения надежности, стойкости к термическим ударам, разработки методов соединения керамических деталей с металлическими и пластмассовыми.

Наиболее эффективно применение керамики для изготовления дизельных адиабатных поршневых двигателей, имеющих керамическую изоляцию, и высокотемпературных газотурбинных двигателей. Компания «Cummins Engine» (США) освоила производство двигателя



Рис. 5.12. Детали двигателя на основе оксидной керамики

грузовика с плазменными покрытиями из ZrO_2 , нанесенными на днище поршня, внутреннюю поверхность цилиндра, впускные и выпускные каналы. Экономия топлива на 100 км пути составила более 30 %. Фирма «Isuzu» (Япония) сообщила об успешной разработке керамического двигателя, работающего на бензине и дизельном топливе (рис. 5.12). Двигатель развивает скорость до 150 км/ч, коэффициент полноты сгорания топлива на 30-50 % выше, чем у обычных двигателей, а масса на 30 % меньше.

Режущий керамический инструмент. Режущая керамика характеризуется высокой твердостью, в том числе при нагреве, износостойкостью, химической инертностью к большинству металлов в процессе резания. По комплексу этих свойств керамика существенно превосходит традиционные режущие материалы – быстрорежущие стали и твердые сплавы.

Для изготовления режущего инструмента применяют керамику на основе оксида циркония, карбидов и нитридов титана, а также нитрида бора и нитрида кремния.

Режущие керамические пластины используются для оснащения различных фрез, токарных резцов, специальных инструментов.

5.3. Композиционные материалы

Основным классом материалов, удовлетворяющим таким жестким, часто противоречащим друг другу требованиям, как обеспечение минимальной массы конструкции, максимальной прочности, жесткости,

надежности и долговечности при работе в тяжелых условиях нагружения, в том числе при высоких температурах и в агрессивных средах, являются *композиционные материалы (композиты)*.

Композиты эффективно конкурируют с такими конструкционными материалами, как алюминий, титан, сталь. К отраслям, активно использующим композиционные материалы и являющимся заказчиками для разработки и производства новых материалов и изделий из них, относятся авиация, космонавтика, наземный транспорт, химическое машиностроение, медицина. Композиты используются для производства автомобилей, объектов железнодорожного транспорта, самолетов, ракет, судов, подводных лодок, трубопроводов, стволов артиллерийских орудий. Материалы, разработка которых первоначально осуществлялась по заказам военных ведомств, внедрены во многих отраслях гражданской промышленности.

Как правило, стоимость композиционных материалов очень высока, что связано со сложностью технологических процессов их производства, высокой ценой используемых компонентов. Однако следует подчеркнуть возможность экономии при производстве сложных конструкций за счет уменьшения количества технологических разъемов, уменьшения количества деталей, сокращения числа сборочных операций. Трудоемкость производства изделий из композиционных материалов можно снизить в 1,5-2 раза по сравнению с металлическими аналогами.

Композиты представляют собой гетерофазные системы, состоящие из двух и более разнородных компонентов, имеющих границы раздела между ними. Компонент, непрерывный по всему объему материала, обеспечивающий его монолитность, называется *матрицей* или связующим. Компоненты, распределенные в матрице, называются *наполнителями*.

По типу матрицы различают композиционные материалы на полимерной, металлической и керамической основе. Матричный материал более вязкий и обеспечивает перераспределение действующей нагрузки по объему, защиту наполнителя от воздействия внешней окружающей среды, определяет электрические и теплофизические свойства, стойкость к старению и технологические свойства композита. Наполнители в композиционные материалы вводят с целью улучшения механических, теплофизических, электрических, магнитных и других свойств. В качестве наполнителей используют твердые, жидкие и газообразные вещества органического и неорганического происхождения.

В зависимости от характера взаимодействия с материалом матрицы наполнители подразделяют на инертные и активные упрочняющие. Ме-

ханизм взаимодействия матрицы с наполнителем определяется химической природой этих материалов и состоянием поверхности наполнителя. Наибольший эффект усиления достигается при возникновении между наполнителем и материалом матрицы химических связей или значительного адгезионного взаимодействия. Наполнители, способные к такому взаимодействию с матрицей, называются активными. Инертными называются наполнители, не способные к этому взаимодействию. Последние применяют для облегчения переработки или снижения стоимости изделий.

По виду и структуре наполнителя композиты делятся на *дисперсно-упрочненные, упрочненные волокнами, слоистые и объемно-армированные* (рис. 5.13).

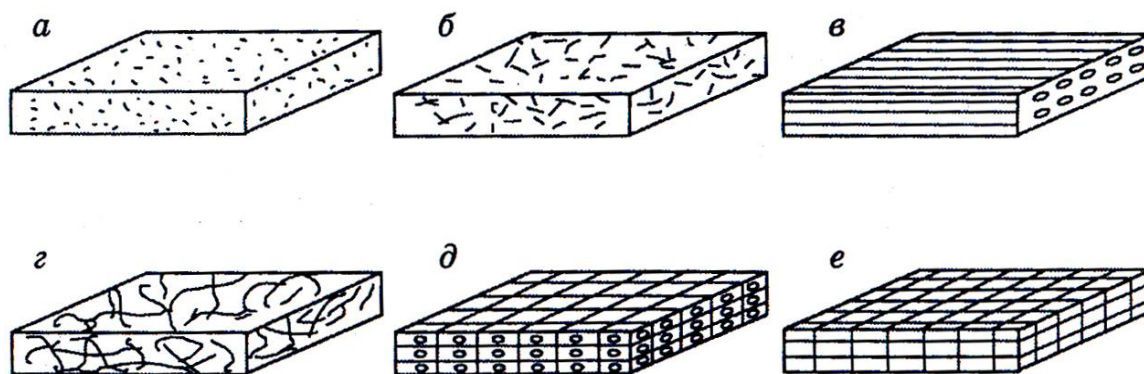


Рис. 5.13. Схема упрочнения композитов: а – дисперсными наполнителями; б – дискретными волокнами; в – однонаправленными волокнами; г – хаотически распределенными волокнами; д – слоистыми наполнителями; е – объемно-армированными волокнами

В качестве *дисперсных наполнителей* широкое применение получили: сульфатная целлюлоза, графит, диоксид кремния, силикаты алюминия, кальция, магния, порошки металлов и сплавов. Некоторые металлические наполнители придают композитам специфические свойства. Например, железо и его сплавы – ферромагнитные; чешуйки алюминия, никеля, серебра – низкую газо- и паропроницаемость; свинца, кадмия, вольфрама – защитную способность при воздействии излучений высоких энергий. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы с равномерно распределенным в объеме материала наполнителем обладают изотропностью свойств, т.е. одинаковыми свойствами во всех направлениях.

В композиционных материалах *волокнистыми наполнителями* служат углеродные, борные, синтетические, стеклянные и др. волокна,

нитевидные кристаллы тугоплавких соединений (карбида кремния, оксида алюминия и др.) или металлическая проволока (стальная, вольфрамовая и др.). Упрочненные волокнами материалы анизотропны, кроме случая хаотического расположения волокон. Упрочняющий эффект при наполнении волокнами диаметром 3...12 мкм сказывается уже при их длине, равной 2...4 мм, благодаря взаимному переплетению и снижению напряжений в связующем. С увеличением длины волокон увеличиваются прочность и ударная вязкость. Свойства материала зависят от состава компонентов, количественного соотношения и прочности связи между ними. Для металлических композиционных материалов прочная связь между волокном и матрицей достигается благодаря их взаимодействию. Связь между компонентами в композиционных материалах на неметаллической основе осуществляется с помощью адгезии.

Из *слоистых наполнителей* применяются: бумага (для получения гетинакса); стеклоткань, углеграфитная ткань (в различного рода текстолитах). Встречаются композиты, в которых слоистым наполнителем являются алюминиевые, титановые, медные, никелевые и кобальтовые листы и фольги, а слоями, определяющими специальные свойства и применение, – керамика, интерметаллидные соединения или другие металлы. Слоистые материалы отличаются анизотропией свойств – имеют высокую прочность при растяжении вдоль слоев армирующего наполнителя и низкую в перпендикулярном направлении. Этот недостаток отсутствует у объемно-армированных материалов.

Объемно-армированные материалы имеют сложное строение с различным расположением наполнителей. Наполнителями служат те же материалы, что и в волокнистых композитах.

Существуют полиматричные и полиармированные композиционные материалы. *Полиматричные* материалы имеют комбинированные матрицы, состоящие из чередующихся слоев матриц с различным химическим составом. *Полиармированные* материалы имеют одновременно упрочнители различной формы или одной формы, но разного химического состава. Например, полимерная матрица с дисперсным и волокнистым упрочнителем или полимерная матрица, упрочненная одновременно двумя видами волокон.

Различные сочетания матричного материала и наполнителя позволяют получать гибридные композиты с широким диапазоном характеристик, чего невозможно достичь на металлах и сплавах. Композиты выгодно отличаются от металлических сплавов своими удельными характеристиками: удельной прочностью σ_v/ρ и удельным модулем упругости E/ρ (рис. 5.14).

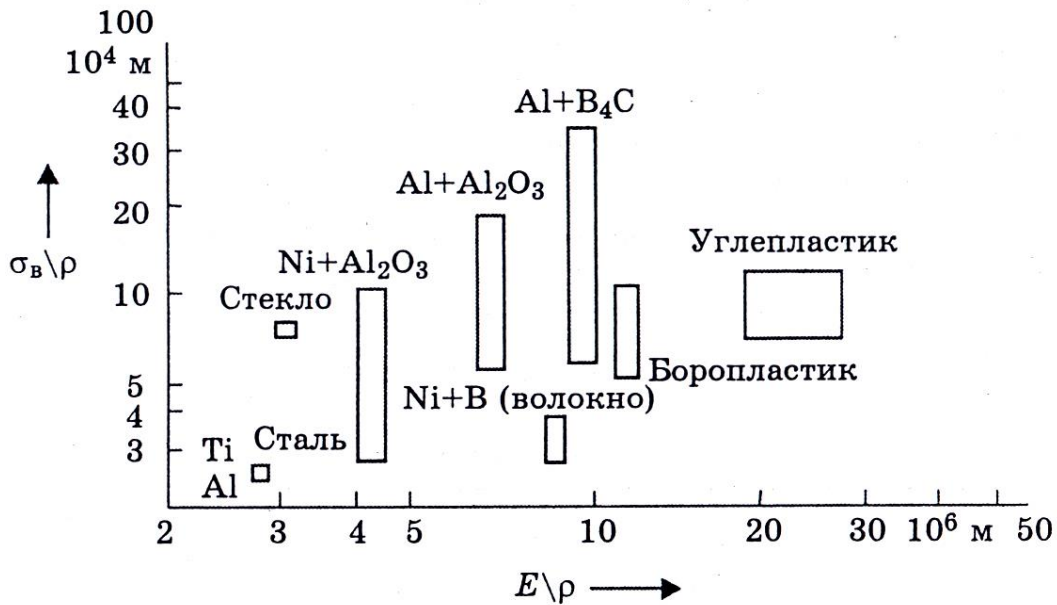


Рис. 5.14. Удельные характеристики композитов (ρ – плотность материала)

Композиты на основе полимерной матрицы обеспечивают работоспособность изделий при температурах до 200 °С, металлокомпозиты на основе алюминия и магния, армированные углеродными, борными и другими волокнами – до 400...500 °С. Более высокие допустимые температуры имеют композиты на основе титана и никеля. Керамические композиты на основе карбидов или нитридов кремния могут работать при температурах до 2000 °С.

Особенностью композитов является удачное сочетание высокой прочности с низкой плотностью и высокой химической стойкостью. Кроме того, в композитах зачастую в 10... 100 раз ниже скорость распространения усталостных трещин, что обеспечивает большую долговечность изделий.

Рассмотрим лишь некоторые композиты применяемые в промышленности.

Спеченная алюминиевая пудра (САП) является характерным представителем дисперсноупрочненных композиционных материалов. САП состоит из алюминиевой матрицы, упрочненной дисперсными частицами оксида алюминия. Алюминиевый порошок получают распылением расплавленного металла с последующим измельчением в шаровых мельницах до размера около 1 мкм в присутствии кислорода. С увеличением длительности помола пудра становится мельче, и в ней повышается содержание оксида алюминия. Дальнейшая технология производства изделий и полуфабрикатов из САП включает холодное прессование, предварительное спекание, горячее прессование, прокатку или вы-

давливание спеченной алюминиевой заготовки в форме готовых изделий, которые можно подвергать дополнительной термической обработке.

Сплавы типа САП удовлетворительно деформируются в горячем состоянии, а сплавы с 6-9 % Al_2O_3 – и при комнатной температуре. Из них холодным волочением можно получить фольгу толщиной до 0,03 мм. Эти материалы хорошо обрабатываются резанием и обладают высокой коррозионной стойкостью. Марки САП, применяемые в России, содержат 6—23 % Al_2O_3 . Различают САП-1 с содержанием 6-9 %, САП-2 с 9-13 % и САП-3 с 13-18 % Al_2O_3 . С увеличением содержания Al_2O_3 повышаются прочность, твердость, жаропрочность САП, но уменьшается пластичность. Высокая прочность САП обусловлена большой дисперсностью оксидной фазы, малым расстоянием между ее частицами – механизм упрочнения дисперсными частицами. Нерастворимость в алюминии и отсутствие склонности к коагуляции мелкодисперсных частиц Al_2O_3 обеспечивает стабильность и высокую прочность при температурах до 500 °С. Даже при температуре 500 °С они имеют σ_b не менее 60-110 МПа.

Сплавы типа САП применяют в авиационной технике для изготовления деталей с высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, работающих при температурах до 300-500 °С. Из них изготавливают штоки поршней, лопатки компрессоров, оболочки тепловыделяющих элементов и трубы теплообменников.

Твердые сплавы. Металлокерамическими твердыми сплавами называют смесь порошков тугоплавких соединений (керамическая составляющая) и металла (металлическая составляющая), спрессованную в изделие необходимой формы и спеченную при высоких температурах. Металл играет роль связки между частицами керамики, обеспечивающей некоторую пластичность материала. В качестве связки используется кобальт. Основная составляющая – карбиды вольфрама, титана и тантала.

В зависимости от состава карбидной основы, твердые сплавы подразделяют на вольфрамовые (например, ВК6, ВК8), титанвольфрамовые материалы (например, Т15К6), титантанталвольфрамовые (например, ТТ7К12). Благодаря высокой твердости, износостойкости и теплостойкости они применяются для изготовления режущего и штампового инструмента, инструмента для бурения скважин.

Недостатком твердых сплавов является повышенная дефицитность исходного вольфрамового сырья – основного компонента, определяющего их повышенные физико-механические характеристики. Поэтому перспективно использование безвольфрамовых твердых сплавов. Это

материалы на основе карбида титана или карбонитрида титана с никель-молибденовой связкой (например, КТС-2). Безвольфрамовые твердые сплавы хорошо работают в условиях абразивного износа, особенно в окислительных средах, но они более хрупкие, чем другие твердые сплавы, и имеют меньшую прочность при изгибе.

Углепластики – композиционные полимерные материалы, армированные наполнителями из углеродных волокон. Матрицей в углепластике могут быть терморезистивные синтетические смолы (эпоксидные, фенольные, полиэфирные, полиимидные) или термопласты (полиамиды, поликарбонаты, полисульфоны, полиэфиры). Наполнители – углеродные нити, жгуты, ленты, ткани, маты, короткие рубленые волокна.



Рис. 5.15. Узел работа конвейерной линии, собранный из деталей УП-ВП

Наибольшее значение имеют углепластики на основе непрерывных высокопрочных и высокомодульных углеродных волокон (УП-ВП, УП-ВМ). Они характеризуются низкой плотностью, высокой прочностью, высоким модулем упругости, вибропрочностью, повышенной химической и радиационной стойкостью, теплопроводностью, практически нулевым коэффициентом линейного расширения и содержат до 60 об. % углеродных волокон.

Углепластики используются как конструкционные материалы в авиакосмической технике, автомобилестроении, судостроении, машиностроении, медицинской технике (рис. 5.15). Однако при конструировании изделий из волокнистых углепластиков необходимо обеспечить преимущественную ориентацию армирующих волокон в направлении действия максимальных нагрузок.

Композиционные материалы с никелевой матрицей используются в качестве жаропрочных. При этом главная задача их создания – повышение рабочей температуры до 1000-1200 °С. В качестве наполнителя могут быть использованы как мелкодисперсные порошки, так и волокна. В качестве упрочняющей фазы в дисперсно-упрочненном композиционном материале на основе никеля и его сплавов используются диоксиды тория ThO_2 и диоксиды гафния HfO_2 . Оксид тория ThO_2 в количестве до 2 % наиболее эффективен для упрочнения никеля и нихрома (композит

ВДУ-1, ТД-никель, DS-никель, TD-нихром). Из-за токсичности оксида тория его часто заменяют оксидом гафния HfO_2 в композите ВДУ-2 (98% Ni, 2% HfO_2), что приводит к существенному снижению жаропрочности. Композиты на основе никеля предназначены в основном для работы при температурах выше 1000 °С. Характеристики длительной прочности при этих температурах выше у композитов с матрицей из не легированного никеля, однако при температурах до 800 °С более высоким временным сопротивлением обладают композиты на основе никелевых сплавов типа TD-нихром (80% Ni, 20% Cr, упрочненный 2 % ThO_2).

Более широко применяется упрочнение жаропрочных никелевых сплавов металлической проволокой. И одним из лучших металлических упрочнителей, способных обеспечить высокие показатели прочности при высоких температурах, является вольфрамовая проволока. Так, введение в сплав никеля с хромом вольфрамовой проволоки в количестве



Рис. 5.16. Лопатки газовых турбин из никелевого композита

от 40 до 70 %, позволяет повысить его жаропрочность при 1100 °С в 2 раза и выше (с 75 МПа до 130 – 250 МПа). Возможно также упрочнение молибденовой проволокой. Перспективными упрочнителями для никелевых сплавов являются нитевидные кристаллы оксида алюминия, карбида и нитрида кремния, углеродные волокна.

Композиционные материалы на основе никеля и его сплавов применяются, главным образом, в авиационной и космической технике для изготовления лопаток газовых турбин, камер сгорания, теплозащитных панелей, а также сосудов и трубопроводов, работающих при высоких температурах в агрессивных средах (рис. 5.16).

Композиционные материалы с борными волокнами широко используются в авиации и ракетно-космической технике. Бор мало разупрочняется с повышением температуры, поэтому композиционные материалы, армированные борными волокнами, сохраняют высокую прочность до 400 – 500 °С. Промышленное применение нашел материал ВКА-1, содержащий 50 об. % непрерывных высокопрочных и высококомодуль-

ных волокон бора в матрице алюминия. По модулю упругости и временному сопротивлению в интервале 20 – 500 °С он превосходит все стандартные алюминиевые сплавы, в том числе высокопрочные (В95), и сплавы, специально предназначенные для работы при высоких температурах (АК4-1). Высокая демпфирующая способность материала обеспечивает вибропрочность изготовленных из него конструкций.

Детали из боропластика и бороалюминия, несмотря на высокую стоимость, применяют такие крупные фирмы США, как "Боинг", "Дженерал Дайнемикс". Из них изготавливают горизонтальные и вер-

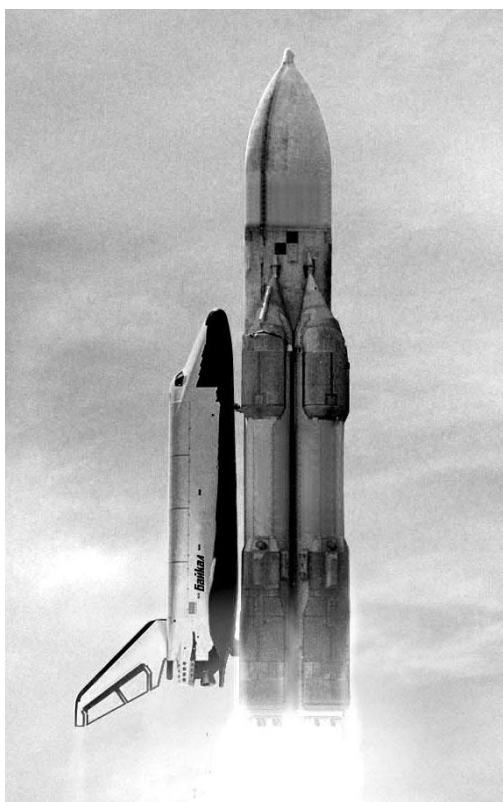


Рис. 5.17. Запуск многоразовой космической системы «Энергия – Буран»

тикальные стабилизаторы, рули, элементы хвостового оперения, лонжероны, лопасти винтов, обшивку крыльев и др.

Расчеты показали, что замена сплава В95 на титановый сплав при изготовлении лонжерона крыла самолета с подкрепляющими элементами из ВКА-1 увеличивает его жесткость на 45 % и дает экономию в массе около 42 %.

Использование композиционных материалов с борными волокнами для изготовления крупных деталей для космических кораблей "Аполлон", "Спейс Шаттл" позволило уменьшить их массу. Так применение композитов в конструкции космического корабля «Спейс Шаттл» позволило снизить его массу на 1402 кг, в том числе за счет боропластика – на 410 кг и бороалюминия – на 82 кг. Такая экономия массы позволила умень-

шить затраты на вывод корабля на орбиту на несколько миллионов долларов, что заранее окупает затраты на стоимость элементов конструкции из этих материалов.

Детали из композиционных материалов широко использовались при разработке космического аппарата «Буран» в последнем космическом проекте СССР (рис. 5.17).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материаловедение служит для решения задач рационального выбора материала для конкретного изделия, работающего в определенных условиях современного производства. Нередко эти условия являются очень специфичными: низкие или высокие температуры, агрессивные химические среды, знакопеременные циклические нагрузки, особые условия трения и т.д. Часто материалы работают в условиях одновременного воздействия нескольких факторов. Поэтому при выборе материала в первую очередь требуется всесторонне рассмотреть условия его работы с учетом влияния наиболее важных факторов.

Важнейшим этапом выбора материала должен быть процесс определения комплекса необходимых свойств материала, обеспечивающих надежную и долговечную работу конструкций, машин и оборудования в заданных условиях эксплуатации. Так как конструкционные материалы характеризуются механическими, физико-химическими и технологическими свойствами, то рассматривать необходимо всю гамму свойств, особенно если в конструкции должны работать разные материалы.

Выбор материала для конкретного применения должен основываться также на стоимости рассматриваемых материалов с учетом экономической рациональности.

Использование при выборе материалов, ранее хорошо зарекомендовавших себя в подобных конструкциях и изделиях из аналогичного материала, вполне оправдано, но может привести к отказу от совершенствования конструкций и изделий. Для целого ряда изделий новой техники, особенно специального назначения, оказывается необходимым разрабатывать принципиально новые материалы с более высоким комплексом свойств, ранее недоступным у серийных материалов.

Для установления сложной взаимосвязи между химическим составом, технологией получения материала, его структурой и свойствами в настоящее время используются научные исследования и эксперименты с применением моделирования условий эксплуатации изделия, в том числе с помощью компьютерных программ. Оптимизация многофакторных технологий проводится с учетом современных производственных возможностей.

Наука о металлах все ближе подходит к тому состоянию, когда можно будет с помощью компьютерных систем прогнозировать и рассчитывать с достаточной точностью свойства новых уникальных металлических сплавов, пластмасс и в первую очередь, композиционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедение: учебник для вузов / Под ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 528 с.
2. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. Материаловедение: Учебник для вузов.– СПб.: ХИМИЗДАТ, 2007. – 784 с.
3. Гуляев А.П. Металловедение: учебник для вузов – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
4. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1992. – 528 с.
5. Козлов Ю.С. Материаловедение. – М.: “Агар”, 1999. – 180 с.
6. Технология конструкционных материалов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / Под ред. А. М. Дальского. – М.: Машиностроение, 2003. – 512 с.
7. Материаловедение и технология металлов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / Под ред. Г. П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2000. – 638 с.
8. Технология металлов и материаловедение / Под ред. Л.Ф. Усовой. – М., Металлургия, 1987. – 536 с.
9. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А. и др. Введение в физику поверхности. – М.: Наука, 2006. – 490 с.
10. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Изд-во МИСИС, 2005. – 432 с.
11. Пейсхаков А.М., Кучер А.М. Материаловедение технология конструкционных материалов. Учебник. – СПб.: Изд-во Михайлова В.А., 2005. – 416 с.
12. Солнцев Ю.П., Пирайнен В.Ю., Вологжанина С.А. Материаловедение специальных отраслей машиностроения. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2007. – 784 с.
13. Чинков Е. П., Багинский А. Г. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебное пособие для вузов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 140 с.
14. Егоров Ю. П., Лозинский Ю. М., Роот Р. В., Хворова И. А. Материаловедение: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999. – 160 с.
15. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учеб. Пособие для студентов вузов / под ред. В.С. Чередниченко.– М.: Омега, 2006. – 752 с.

16. Моряков О.С. Материаловедение: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. – М.: Издательский центр “Академия”, 2008. – 240 с.
17. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2006. – 384 с.
18. Ржевская С.В. Материаловедение: учебник для вузов. – М.: Логос, 2006, – 424 с.
19. Кенько В.М. Неметаллические материалы и методы их обработки: учебное пособие для вузов. – Минск: Дизайн ПРО, 1998. – 240 с.
20. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.
21. Лозинский Ю.М., Безбородов В.П. Термическая обработка алюминиевых сплавов / Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу “Материаловедение” для студентов машиностроительных специальностей. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 10с.
22. Конева Н.А., Козлов Э.В. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / Под. ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1990. – 123 с.
23. Клименов В.А., Ковалевская Ж.Г., Перевалова О.Б. и др. Влияние ультразвуковой обработки поверхности стали 40Х13 на микроструктуру азотированного слоя, сформированного при высокоинтенсивной низкоэнергетической имплантации ионами азота // Физика металлов и материаловедение. – 2006. – Том 102. – № 6. – С. 621-629.
24. Шаркеев Ю.П., Ерошенко Ю.А., Братчиков А.Д. и др. Объемный ультрамелкозернистый титан с высокими механическими свойствами для медицинских имплантантов // Нанотехника. – 2007. – № 3 (11). – С. 81-88.
25. Муш Г., Негели К, Шпрингер К. -Х. Руки роботов из волокнистых композитов // Пластмассы. – 2008. – №10. – С. 2-6.
26. Рогалла А., Друммер Д., Риль М. Новые разработки для медицинской техники // Пластмассы. – 2008. – №1. – С. 8-13.
27. Бродова И.Г., Попель П.С., Барбин Н.М., Ватолин Н.А. Исходные расплавы как основа формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005 – 369 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ. МЕТОДЫ АНАЛИЗА СТРОЕНИЯ. ОЦЕНКА СВОЙСТВ	4
1.1. Классификация конструкционных материалов	4
1.2. Методы изучения строения конструкционных материалов	5
1.3. Оценка свойств конструкционных материалов	10
2. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	18
2.1. Кристаллическое строение металлов	18
2.2. Строение металлических сплавов	26
2.3. Диаграммы состояния сплавов	29
3. ОСНОВНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ	37
3.1. Железоуглеродистые сплавы	37
3.2. Цветные сплавы	45
4. ИЗМЕНЕНИЕ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ	56
4.1. Основные механизмы упрочнения сплавов	57
4.2. Наклеп и рекристаллизация	59
4.3. Изменение условий кристаллизации сплава	65
4.4. Термическая обработка сплавов	71
5. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	84
5.1. Строение и свойства полимеров	85
5.2. Неорганические материалы	93
5.3. Композиционные материалы	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
ЛИТЕРАТУРА	107

**Жанна Геннадьевна Ковалевская
Валерий Павлович Безбородов**

**ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ. КОНСТРУКЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**

Учебное пособие

Научный редактор
кандидат технических наук, доцент Ю.П. Егоров

Подписано к печати
Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Плоская печать. Усл. печ. л. . Уч. -изд. л.
Тираж экз. Заказ . Цена свободная.
Издательство ТПУ. 634034, Томск, пр. Ленина, 30.