

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 высокомолекулярных 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., конструктивных 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 конструктивных 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.

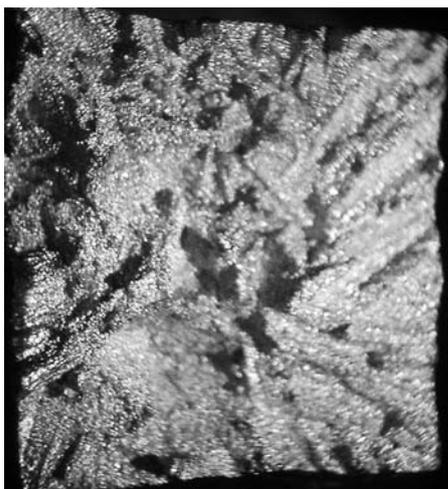


Рис. 1.2. Излом бронзовой отливки ($\times 50$)

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

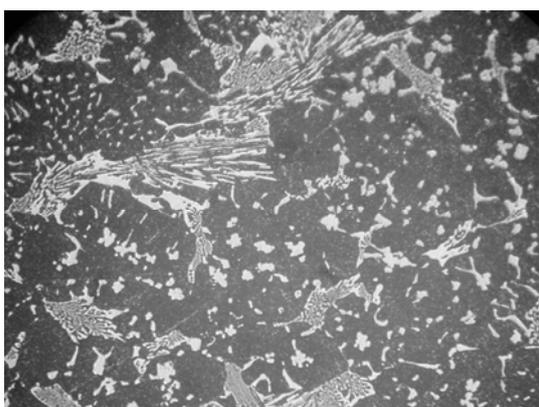


Рис. 1.3. Микроструктура литейной легированной стали ($\times 500$)

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 являются *микрошлифы* с блестя-

щей 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).

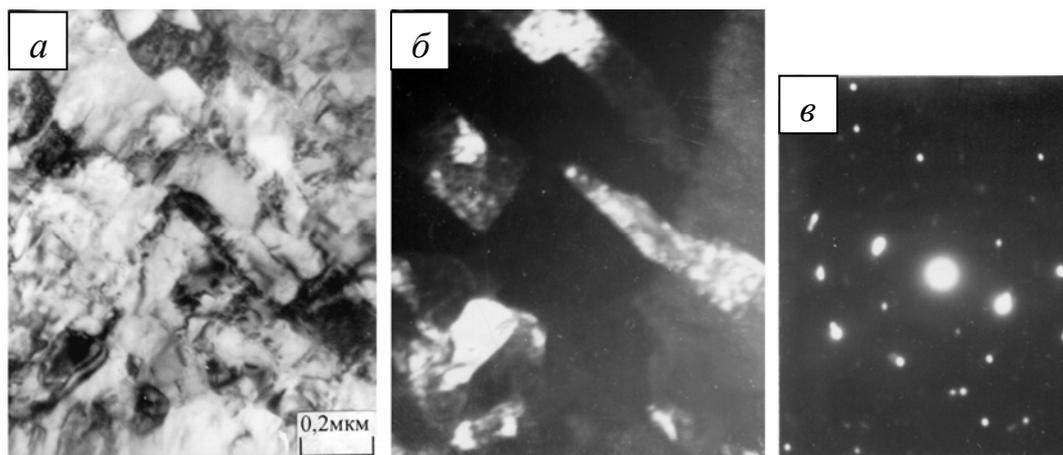


Рис. 1.4. Изображение субзерен феррита в стали 20, полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии: а – светлое поле; б – темное поле в рефлексе $[110]$ α -Fe; в – микроэлектроннограмма ($\times 50000$).

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.

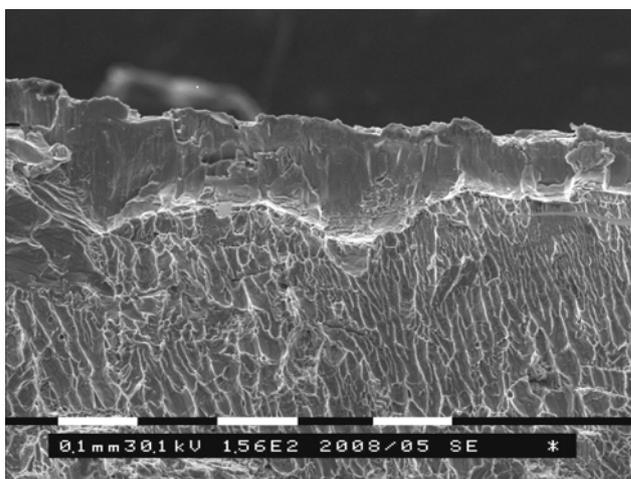


Рис. 1.5. Изображение излома поверхностного слоя титана, полученное с помощью растровой электронной микроскопии ($\times 1000$)

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.

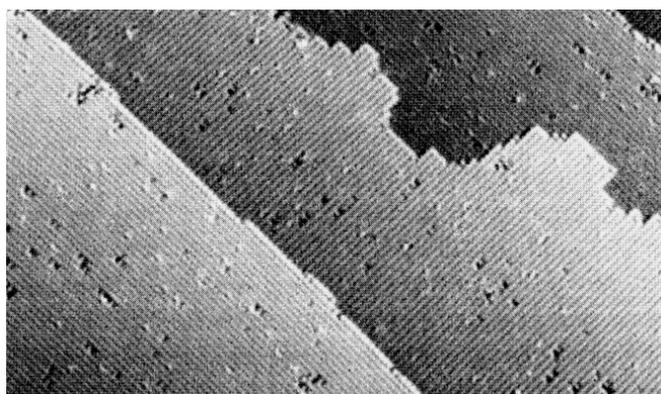


Рис. 1.6. Изображение выхода на поверхность кристаллографических плоскостей кремния, полученное с помощью атомно-силовой микроскопии ($\times 200000$)

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.

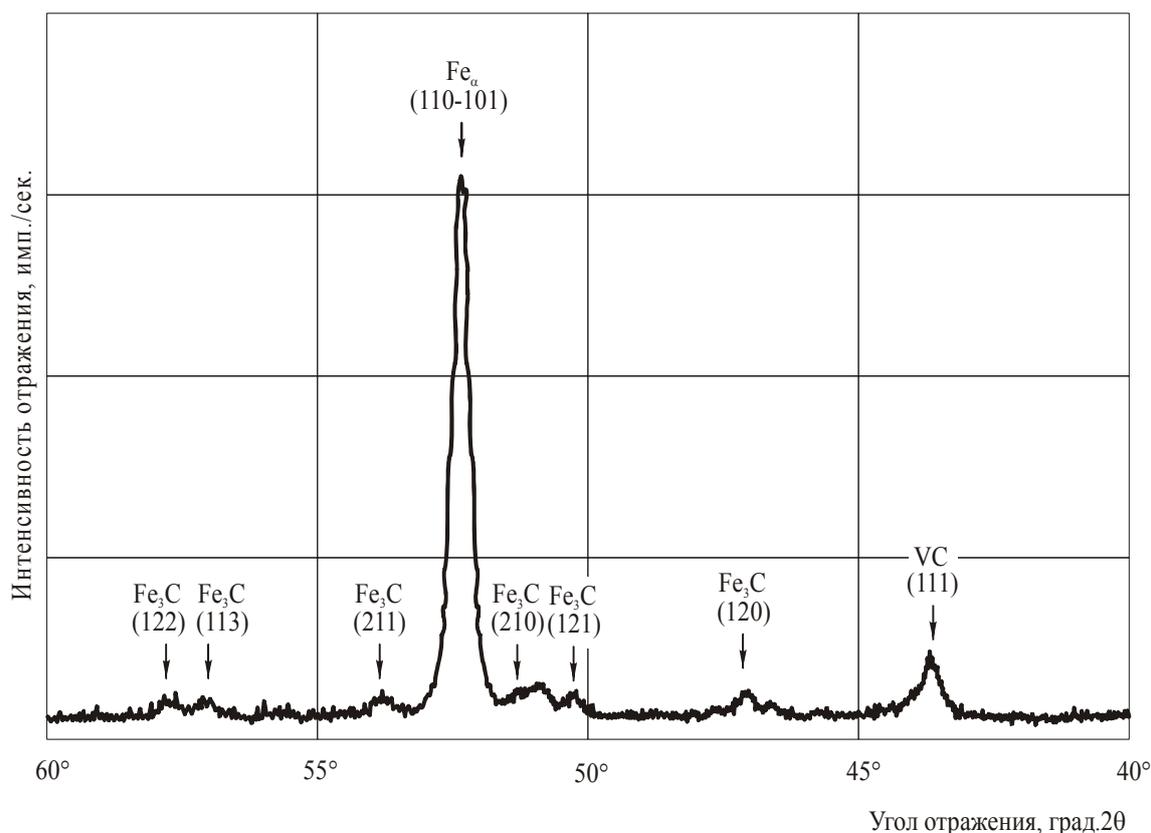


Рис. 1.7. Дифрактограмма литейной стали марки 260Х6ВФ9 с указанием идентифицированных рефлексов основных фаз (α -Fe, карбидов Fe_3C и VC)

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 испытуемый образец закрепляют в захватах разрывной машины и деформируют при плавно возрастающей (статической) нагрузке.

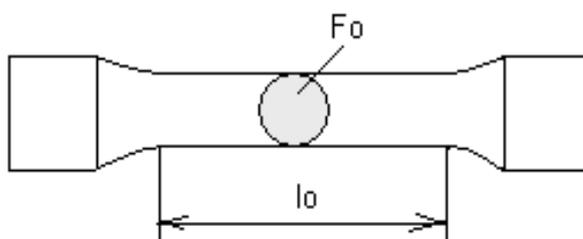


Рис.1.8. Стандартный образец для испытания на растяжение

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».

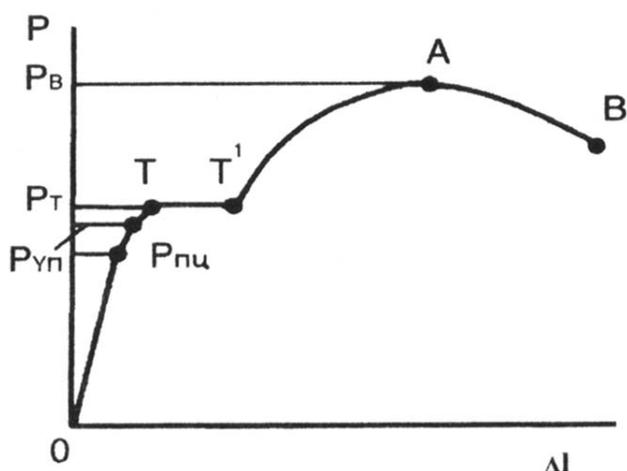


Рис.1.9. Диаграмма растяжения образца из низкоуглеродистой стали

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

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

$$\sigma_y = P_y / F_0, \text{ МПа.}$$

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.

$$\sigma_T = P_T / F_0, \text{ МПа.}$$

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:

$$\sigma_B = P_B / F_0, \text{ МПа.}$$

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:

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

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

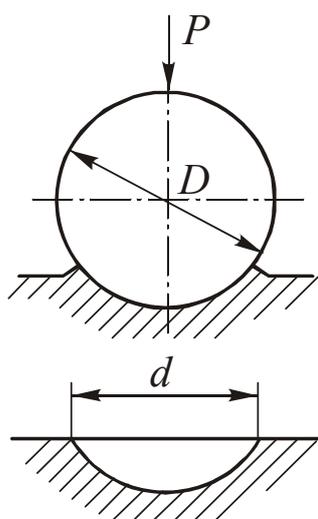
Относительное сужение (Ψ) также измеряется в процентах и определяется по формуле:

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

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 закаленного шарика ($D = 1,6$ мм). Конус применяют для металлов с твёрдостью

больше 230 НВ, а шарик – для металлов с твердостью меньше этой величины. Твердость определяется по глубине впадины (рис. 1.11).

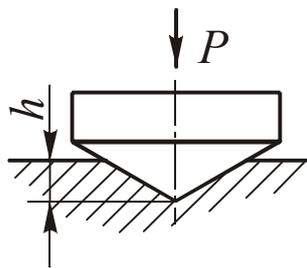


Рис. 1.11. Схема измерения твердости по Роквеллу

Твердость по Роквеллу в зависимости от твердости 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 твердости по Роквеллу являются быстрота измерений, возможность измерять твердость закаленных сталей и других очень твердых материалов, а также тонких изделий, покрытий и слоёв толщиной до 0,4 – 0,7 мм.

Твердость 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 твердости по среднеарифметической длине диагоналей.

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

Метод измерения микротвердости предназначен для определения твердости структурных составляющих и фаз в металлах, а также очень тонких поверхностных слоёв и покрытий толщиной в сотые доли миллиметра. Метод измерения микротвердости аналогичен методу Виккерса. Различие в том, что четырехгранная пирамида в первом методе име-

ет 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).

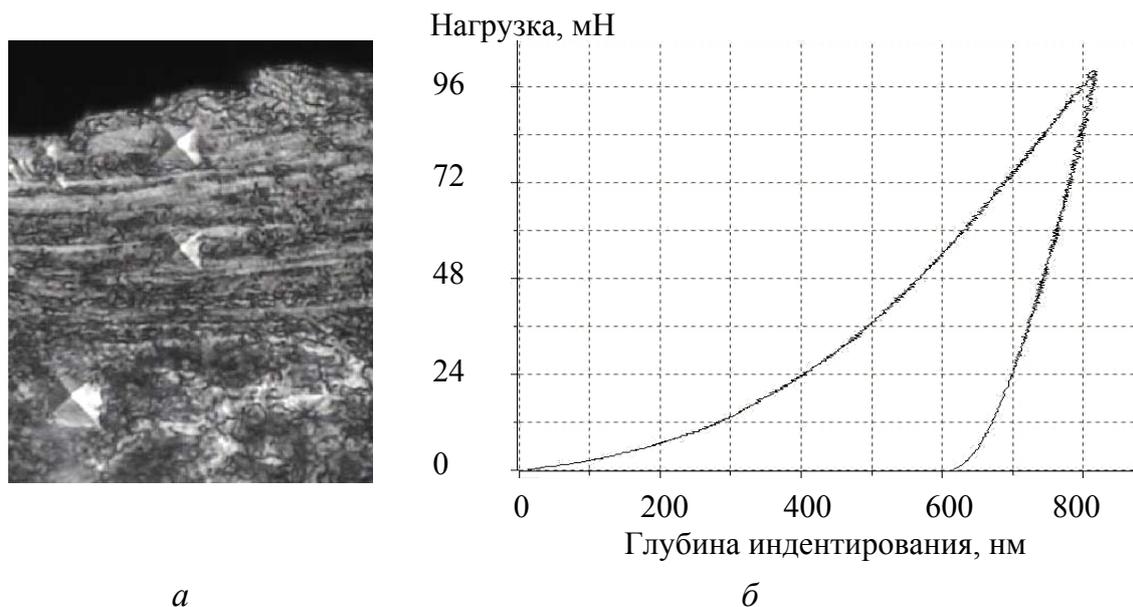


Рис. 1.12. Отпечатки нанотвердости на поперечном шлифе стали 60 ($\times 1000$) (а) и диаграмма нагружения при наноиндентировании (б)

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:

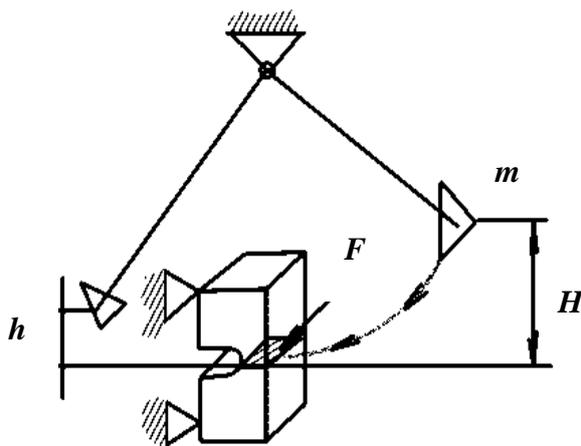


Рис. 1.12. Схема испытания на ударную вязкость

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

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

Значение ударной вязкости определяется по формуле:

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

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.

