

ВВЕДЕНИЕ

Основой научно-технического прогресса и развития экономики любой страны являются материалы. Только правильный, рациональный выбор материала позволит создать новые, прогрессивные виды оборудования с повышенными эксплуатационными характеристиками и высокой надёжностью.

Конструкционные материалы — это материалы, из которых изготавливают детали машин, механизмов, элементы сооружений, различных конструкций. Дисциплина «Конструкционные материалы» устанавливает взаимосвязь между химическим составом, структурой и свойствами материалов и изучает закономерности их изменения под внешним воздействием.

Цель дисциплины – дать будущему специалисту электромеханику знания о строении материалов, об изменении их структуры, свойств и поведения в определённых условиях эксплуатации. Это позволит сформулировать критерии выбора необходимого материала с учётом экономических и экологических факторов для обеспечения долговечной и надёжной работы разных по своему функциональному назначению и конструкции изделий. Правильный выбор материала определяет как качество, так и стоимость производства изделий и их ремонт.

Данные методические указания ориентированы на самостоятельную работу студентов с целью помочь верно сориентироваться в необходимом объёме знаний и более глубоко их усвоить.

Знания дисциплины «Конструкционные материалы» необходимы при изучении курсов «Электроматериаловедение», «Электрооборудование автомобилей и тракторов», «Основы технологии производства и ремонта электрооборудования автомобилей и тракторов», для курсового и дипломного проектирования.

РАЗДЕЛ 1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Тема 1. Кристаллизация и строение металлических материалов

Основные вопросы темы

Классификация конструкционных материалов. Металлы и сплавы. Кристаллизация, атомно-кристаллическое строение. Полиморфизм.

Указания к изучению темы

По природе конструкционные материалы разделяются на металлические, неметаллические, композиционные и порошковые.

К металлическим материалам преимущественно относятся сплавы на основе железа (стали и чугуны) и сплавы цветных металлов.

Неметаллические материалы – это пластмассы, керамика, стекло, резина, древесина.

Новым классом конструкционных материалов являются композиты. Они состоят из пластической основы (матрицы), в которой распределены упрочнители (тонкая металлическая проволока, волокна, нитевидные кристаллы, армирующие частицы – оксиды, карбиды, нитриды и др.). Композиты могут быть слоистыми, состоящими из чередующихся слоёв (фольг, пластин, лент) разных материалов с разными свойствами.

В промышленности широко используются материалы из порошков, получаемые путём прессования и спекания. Порошки изготавливают из металлов, их сплавов, химических соединений, неметаллических материалов. Из порошков получают материалы, которые другими методами получить невозможно, например, из металлов с резко отличающимися температурами плавления ($W+Cu$), из металлов и неметаллов ($Fe+графит$). Порошковые материалы позволяют экономить материалы при изготовлении детали, а также уменьшить металлоёмкость всей конструкции.

По условиям работы различают жаростойкие, износостойкие, коррозионностойкие, жаропрочные и др. материалы специального назначения.

Каждый материал имеет определённое наименование и марку, например, сталь 40, бронза БрС30, латунь Л80.

Основными конструкционными материалами, из которых изготавливают около 95 % деталей машин, являются металлические сплавы, которые обладают комплексом определённых свойств, необходимых для их эксплуатации.

Металлы составляют около трёх четвертей всех существующих в природе элементов, однако не все из них используются для получения конструкционных материалов. Базовыми для сплавов являются железо, медь, алюминий, никель, свинец, магний, цинк, титан и некоторые другие.

Металлы – это химические элементы, имеющие специфический блеск, высокие показатели пластичности, тепло- и электропроводности по сравнению с другими твёрдыми телами.

В зависимости от пространственного расположения атомов все твёрдые тела делятся на кристаллические и аморфные.

Металлы и сплавы – это кристаллические тела, атомы (ионы) которых расположены в пространстве в закономерном геометрическом порядке, образуя кристаллическую решётку. В аморфных телах атомы расположены хаотически, неупорядоченно.

Кристаллическая решётка формируется в процессе кристаллизации. Различают первичную и вторичную кристаллизацию. Первичная – это зарождение и рост кристаллов в жидком материале. Она присуща всем кристаллическим телам. Вторичная кристаллизация – это образование кристаллов нового типа в уже закристаллизовавшемся твёрдом материале.

Кристаллизация осуществляется за счёт двух процессов: 1 – образование зародышей кристаллизации, 2 – рост кристаллов. Это два процесса реализующихся одновременно: кристаллы, которые зародились первыми, подрастают, а новые – образуются (рис. 1.1, стадии 1-6).

Первичные кристаллы имеют правильную форму (кубическую, ромбическую, шестиугольную и др.) в зависимости от типа кристаллической решётки материала.

Затем по мере увеличения количества кристаллов и их размеров они сталкиваются и теряют правильную форму. Кристаллы приобретают неправильную внешнюю форму, сохраняя правильное

внутреннее строение. Такие кристаллы, образовавшиеся после завершения кристаллизации, называются *кристаллитами*, или *зернами* (рис. 1.1, стадия 7). Они имеют вид полиэдров (многоугольников).

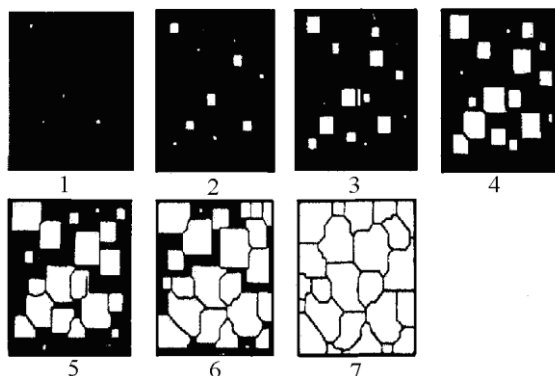


Рис. 1.1 – Стадии процесса кристаллизации

Процесс кристаллизации усложняется тем, что в направлении большего отвода тепла рост кристаллов происходит быстрее, чем в других направлениях. Это приводит к образованию кристаллов древовидной формы, которые называются *дендритами*. Вследствие столкновения дендритные кристаллы могут утратить свою форму и тогда сформируются полиэдры.

Процесс кристаллизации количественно можно оценить двумя параметрами: скоростью зарождения центров кристаллизации [V_z] и скоростью их роста [V_p]. V_z – это количество центров, образующихся в единице объема жидкого металла за единицу времени [$1/\text{мм}^3 \cdot \text{с}$], [$1/\text{мм}^3 \cdot \text{мин}$]. V_p – это скорость увеличения линейного размера кристалла за единицу времени [$\text{мм} / \text{с}$], [$\text{мм} / \text{мин}$].

Размеры образовавшегося зерна зависят от соотношения величин V_z и V_p . При малой V_z кристаллов и большой V_p их в результате кристаллизации образуется крупное зерно. При большой V_z и малой V_p формируется мелкое зерно. Основным условием получения мелкозернистого металла является большая степень переохлаждения жидкого раствора.

Размер зерна сильно влияет на свойства металлов и сплавов на их основе. Чем мельче размер зерна, тем выше комплекс свойств. Существуют следующие способы измельчения зерна при кристаллизации:

- 1) увеличение скорости охлаждения;

2) модифицирование – введение в жидкий металл дополнительных центров кристаллизации.

Для этого используют примеси (модификаторы) химических элементов, которые образуют тугоплавкие соединения, кристаллизующиеся в первую очередь. Эти соединения (карбиды, нитриды, оксиды) выполняются в виде мельчайших частичек, которые и являются зародышами кристаллов, возникающих в процессе охлаждения. Для стали в качестве модификаторов используют Al, V, Ti, Y, для чугуна – Mg, Al, Ce, Y.

Каждый металл (сплав) в процессе кристаллизации образует определённую кристаллическую решётку. Это воображаемая пространственная сетка с атомами в узлах. Тип кристаллической решётки представляют в виде одной элементарной ячейки, которая и повторяется во всех трёх измерениях.

Наибольшее распространение имеют три типа кристаллических решеток: кубическая объёмноцентрированная – ОЦК (Cr, W, Mo, Fe_α), кубическая гранецентрированная – ГЦК (Ni, Cu, Al, Fe_γ) и гексагональная плотноупакованная – ГПУ (Mg, Ti, Zn и др.) (рис.1.2).

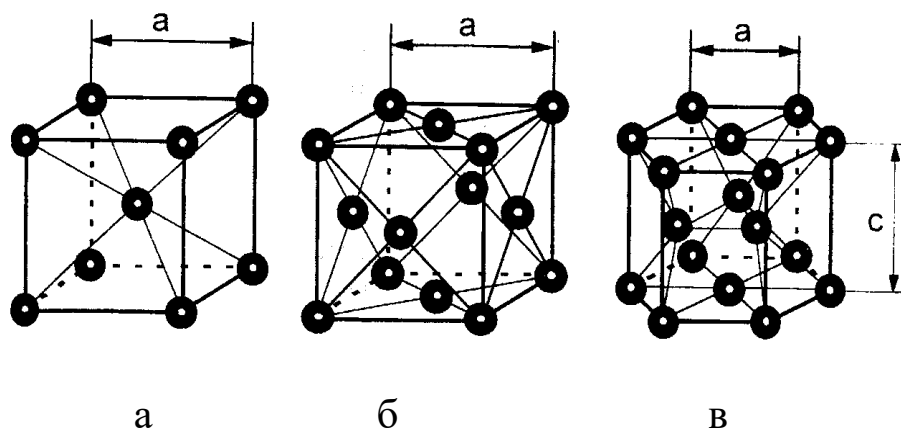


Рис. 1.2. – Виды решёток: а – кубическая объёмноцентрированная, б – кубическая гранецентрированная, в – гексагональная плотноупакованная

Для характеристики элементарной кристаллической ячейки необходимо знать три ребра (а, б, с) и три угла между осями α , β , γ .

В пределах элементарной кристаллической ячейки наблюдается анизотропия (различия) свойств (электрических, механических).

Например, различие свойств вдоль ребра куба решётки Fe_α и вдоль диагонали объясняются различной плотностью атомов и различными расстояниями между ними.

Поэтому необходимо знать атомные плоскости и направления в кристаллических решётках и их кристаллографические обозначения.

Примеры обозначения главных плоскостей в кубической системе представлены на рис. 1.3 (а, б и в). Индексы плоскостей записываются в круглых скобках: (001), (010), (100). Если имеют в виду не одну плоскость, а группу в целом, то индексы записывают в квадратных скобках: [001], [010], [100].

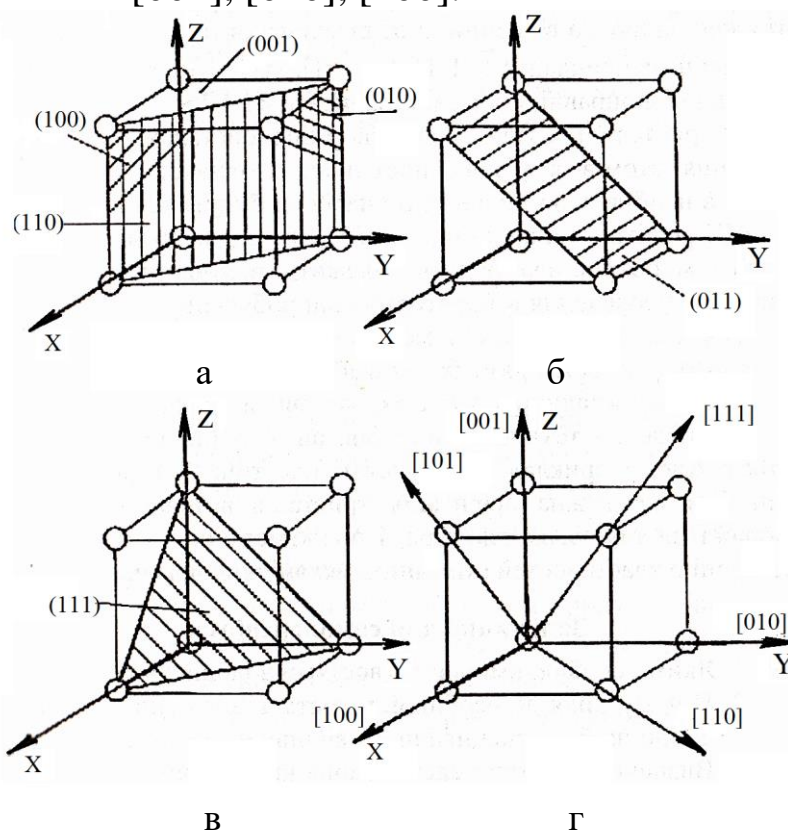


Рис. 1.3. – Индексы кристаллографических плоскостей (а, б, в) и направлений (г)

Индекс направления определяется координатами вектора, выходящего из начала координат и параллельного исходному направлению (рис. 1.3, г). Индексы направлений указываются в квадратных скобках и являются индексами данного направления и всех параллельных ему направлений, расположенных одно от другого на период идентичности.

Так как металлы и сплавы имеют поликристаллическую структуру, то они в равновесном состоянии изотропны.

Один и тот же металл может существовать в нескольких кристаллических формах при разных температурах. Это свойство получило название *полиморфизм*. Различные кристаллические формы металла называются полиморфными модификациями и обозначаются они греческими буквами α , β , γ , δ . Например, железо до 911°C имеет решётку ОЦК и называется Fe_α , выше 911°C – решётку ГЦК и называется Fe_γ .

Вследствие полиморфного превращения в твёрдом веществе образуются новые кристаллы. Это процесс вторичной кристаллизации. Он имеет место также при изменении растворимости одного элемента в кристаллической решётке другого и выделении избыточных кристаллов.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое конструкционные материалы?
2. Как классифицируют конструкционные материалы?
3. Какие элементы относятся к металлам?
4. Что собой представляет кристаллическая решётка?
5. Что такое кристаллизация?
6. В чем отличие первичной кристаллизации от вторичной?
7. Что такое зерно?
8. Какими параметрами характеризуют процесс кристаллизации?
9. Как практически можно измельчить зерно?
10. Какие кристаллические решётки наиболее распространены среди металлов?
11. Что такое полиморфизм? Его практическое значение.

Литература: [1, с. 49-55; 2, с. 4-7]

РАЗДЕЛ 2. СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Тема 1. Механические свойства металлов и сплавов

Основные вопросы темы

Классификация свойств материалов. Механические свойства: прочность, пластичность, твёрдость, вязкость.

Указания к изучению темы

Материалы имеют физические, химические, технологические и эксплуатационные свойства.

К *физическим* относятся: плотность, температура плавления, тепло- и электропроводность, магнитная проницаемость, коэффициент линейного расширения и др.

К *химическим* относятся: стойкость против окисления и растворения в разных агрессивных средах, способность к образованию химических соединений и др.

Технологические свойства характеризуют способность материалов поддаваться различным методам обработки.

Эксплуатационные – это свойства, определяющие поведение изделия в процессе эксплуатации. Их разделяют на общие, учитываемые для любых изделий независимо от условий эксплуатации, и специальные, которые оказываются основными для деталей машин в конкретных условиях эксплуатации.

К *общим* относятся стандартные *механические свойства*, определяемые в соответствии с государственными стандартами. К *специальным* – коррозионная стойкость, длительная прочность, ползучесть и др.

К *механическим свойствам* относятся прочность, твёрдость, пластичность, вязкость.

Прочность характеризует способность материала сопротивляться деформации и разрушению.

Деформация – это изменение размеров и формы изделия под воздействием внешних сил или внутренних напряжений. Деформация делится на упругую и пластическую. *Упругой* называется де-

формация, которая исчезает, а пластической – которая остается после устранения причины, что ее вызвала.

Показатели прочности чаще всего определяют при испытаниях на растяжение стандартных цилиндрических (рис. 2.1, а) или плоских образцов (рис. 2.1, б).

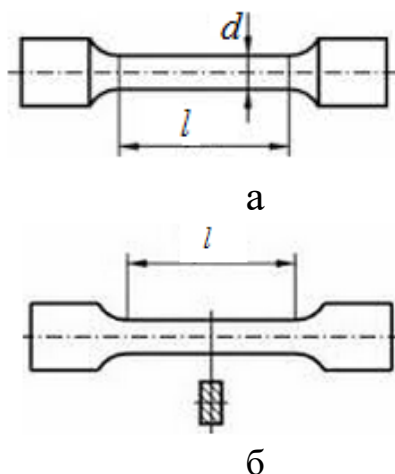


Рис. 2.1 – Стандартные образцы для испытания на растяжение

Испытания осуществляются на разрывных машинах (рис. 2.2).



Рис. 2.2 – Разрывная машина для испытаний на растяжение модели
UIT STM

При растяжении образца записывается зависимость между растягивающей образец силой P , и его абсолютным удлинением – $P=f(\Delta l)$. Такая зависимость называется кривой, или диаграммой растяжения.

Однако одна и та же сила может действовать на разные сечения реального изделия и нагруженность малого сечения будет выше, чем большого. Поэтому в расчётах показателей прочности пользуются не силой, а удельной нагрузкой, которая приходится на единицу площади. Этот показатель называют напряжением.

Напряжение – это сила, отнесённая к площади поперечного сечения образца:

$$\sigma = \frac{P}{F}, \frac{H}{\text{мм}^2} \text{ или МПа} \quad (2.1)$$

Для определения показателей прочности зависимости $P=f(\Delta l)$ перестраивают в диаграмму напряжение σ – относительное удлинение ε ($\sigma=f(\varepsilon)$).

Вид диаграмм растяжения зависит от свойств испытываемых материалов. На рис. 2.3 приведены три кривых растяжения: а – для малопрочных материалов; б – для достаточно прочных и пластичных материалов, в – для хрупких материалов.

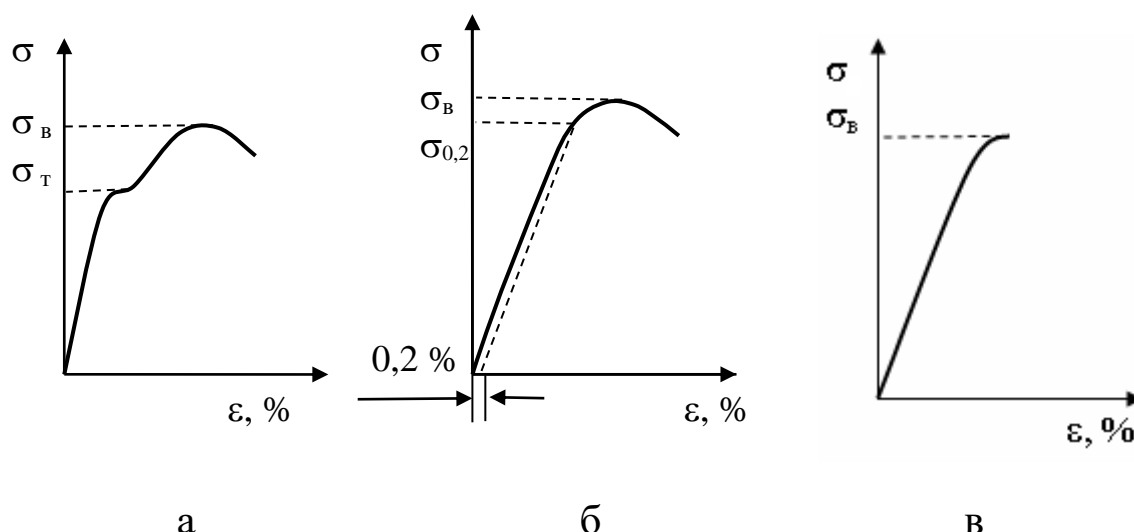


Рис. 2.3 – Диаграммы растяжения $\sigma=f(\varepsilon)$ для малопрочных (а), для прочных и пластичных (б) и хрупких материалов (в)

При статических испытаниях на растяжение показателями прочности являются $\sigma_{0,05}$ ($\sigma_{0,005}$), σ_T , $\sigma_{0,2}$, σ_B :

$\sigma_{0,05}$ ($\sigma_{0,005}$) – условный предел упругости – напряжение, которое вызывает остаточную деформацию 0,05 (0,005) %:

$$\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0}, \quad (2.2)$$

где $P_{0,05}$ ($P_{0,005}$) – сила, приводящая к деформации 0,05 (0,005)%;

F_0 – площадь поперечного сечения образца в исходном состоянии до испытания;

σ_T – физический предел текучести – напряжение, при котором образец деформируется без увеличения нагрузки:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \quad (2.3)$$

где P_T – сила, при которой происходит удлинение образца без увеличения нагрузки;

$\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести – напряжение, вызывающее остаточную деформацию 0,2 %:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}, \quad (2.4)$$

где $P_{0,2}$ – сила, которая вызывает остаточную деформацию 0,2 %.

σ_B – временное сопротивление (для хрупких материалов предел прочности) – это максимальное напряжение, которое выдерживает материал при испытании без разрушения:

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0}, \quad (2.5)$$

где P_{\max} – максимальная сила растягивающая образец.

Показатели $\sigma_{0,05}$ ($\sigma_{0,005}$), $\sigma_{0,2}$ (σ_T) характеризуют сопротивление материала деформации, а σ_B – сопротивление материала разрушению.

Основной расчётной характеристикой при выборе материала изделия является $\sigma_{0,2}$.

Пластичность – это способность материала необратимо менять свою форму и размеры без разрушения. Показатели пластичности: δ – относительное удлинение и ψ – относительное сужение определяются при испытаниях на растяжение:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100, \% , \quad (2.6)$$

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100, \% , \quad (2.7)$$

где l_0 и F_0 – длина и площадь поперечного сечения образца до испытания;

l и F_k – длина и площадь сечения в месте разрушения (рис. 2.4).

При нагрузке, превышающей максимальную (P_{max}) деформация, сосредотачивается в определённом месте образца и возникает шейка. Именно здесь и происходит разрушение.

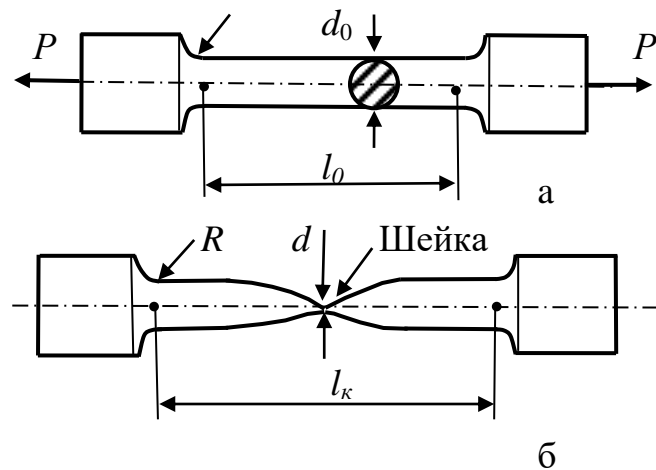


Рис. 2.4 – Образец до (а) и после (б) испытания на растяжение

Чем выше показатели δ и ψ , тем меньше склонность материала к хрупкому разрушению и тем больше надёжность изделия. Наиболее важным является показатель ψ .

Твёрдость – это способность материала сопротивляться внедрению более твердого тела (индентора).

Наиболее распространённые методы определения твёрдости: по Бринеллю, по Роквеллу, по Виккерсу и др.

Суть метода *Бринелля* в том, что твердосплавный шарик диаметром 10; 5; 2,5; 1 мм вдавливается в поверхность материала под нагрузкой от 15,6 до 3000 кгс (рис. 2.5, а). Твёрдость определяется как отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка и имеет размерность Н/мм², кгс/мм² или МПа. Если нагрузка выражена в Н, то твёрдость вычисляется по формуле:

$$HBW = 0,102 \frac{F}{S} = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \frac{H}{\text{мм}^2} \text{ или МПа} \quad (2.7)$$

где HBW – символьное обозначение твёрдости (индентор – твердосплавный шарик);

S – площадь поверхности отпечатка, мм²;

F – нагрузка, Н

0,102 – переводной коэффициент от кгс/мм² к Н/мм²;

D – диаметр шарика, мм;

d – диаметр отпечатка, мм.

Числовые значения твёрдости одинаковы при нагрузке в кгс и в Н. На практике для определения значений твёрдости по Бринеллю пользуются таблицами, созданными по расчётным формулам (2.7).

Твёрдость определяется числом и буквами 600HBW, без указания размерности. Верхняя граница измерения твёрдости по Бринеллю 650 HBW. Для пластичных материалов между HB и σ_b существует связь. Для стали $\sigma_b \approx (0,33-0,36) \text{ HB}$, для медных сплавов $\sigma_b \approx 0,45 \text{ HB}$, для алюминиевых сплавов $\sigma_b \approx 0,35 \text{ HB}$.

Метод определения твёрдости по *Виккерсу* (HV) – твёрдость измеряется по длине двух взаимно перпендикулярных диагоналей отпечатка четырёхгранной пирамиды с углом при вершине 136° (при нагрузке 10–1000 Н) (рис. 2.5, в). Для определения значений твёрдости используют специальные таблицы. Размерность Н/мм² или МПа.

В зависимости от вида индентора и приложенной нагрузки твёрдость по Роквеллу измеряется по трём шкалам – А, В, С.

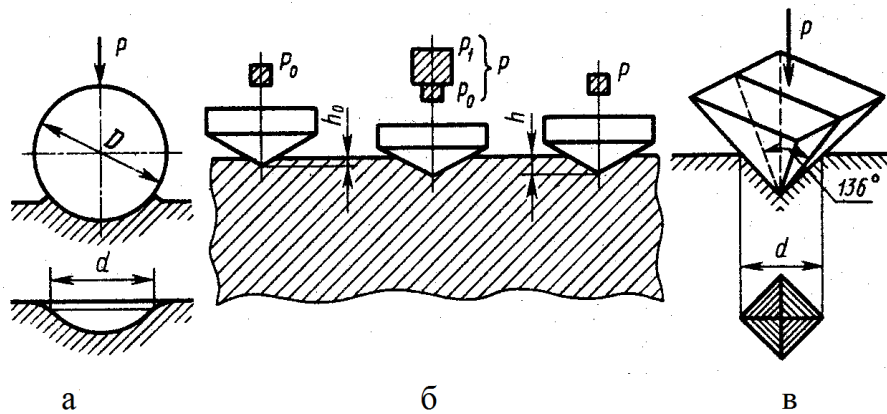


Рис. 2.5 – Схема определения твёрдости по Бринеллю (а), Роквеллу (б) и Виккерсу (в)

Твёрдость сверхтвёрдых и очень тонких слоёв поверхности измеряют по шкале *A* (HRA) алмазным конусом с углом при вершине 120° при нагрузке 588Н (≈ 60 кгс). Для материалов с высокой твёрдостью используют также алмазный конус и нагрузку 1471 Н (≈ 150 кгс). Измерения производят по шкале *C* (HRC). Твёрдость относительно мягких материалов измеряют стальными или твердосплавными шариками при нагрузке 981 Н (≈ 100 кгс) по шкале *B* (HRB). Твёрдость по Роквеллу измеряется в безразмерных единицах. В единицы Бринелля твёрдость по Роквеллу может быть переведена с использованием специальных таблиц.

Этот метод дает возможность измерять твердость как мягких, так и твердых материалов, отличается высокой точностью.

Циклическая смена нагрузок по величине или по знаку приводит к постепенному накоплению в металле повреждений, которые приводят к пикам напряжений, появлению и развитию трещин, и в итоге к разрушению. Явление постепенного накопления повреждений в металле называется *усталостью*.

Усталостное разрушение является одним из основных видов разрушений.

Сопротивление материала усталостному разрушению характеризуется *пределом выносливости* и обозначается σ_R . Для определения этой характеристики образцы определенной формы подвергают циклическим нагрузкам, которые изменяются по синусоидальному закону. Для симметричного цикла коэффициент асимметрии цикла

$R = |\sigma_{\min}| / |\sigma_{\max}| = -1$ при $\sigma_{\min} = \sigma_{\max}$ и предел выносливости обозначается σ_{-1} .

По результатам исследований строят кривую усталости $\sigma = f(N)$ (рис. 2.6).

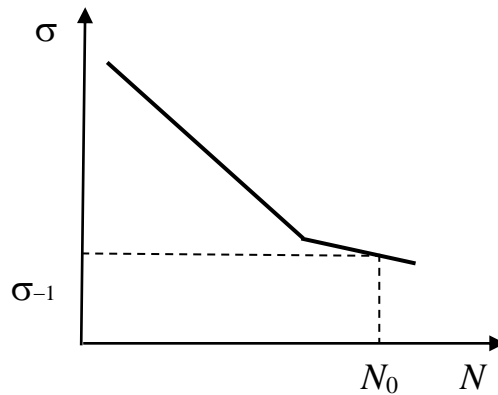


Рис. 2.6 – Диаграмма усталости: σ – напряжение; N – количество циклов нагрузки; N_0 – база; σ_{-1} – предел выносливости

Предел выносливости – это наибольшее напряжение цикла, которое выдерживает металл без разрушения за количество циклов N_0 , которое называется *базой*. База испытаний зависит от материала: для сталей $N_0 = 5 \cdot 10^6$ циклов, для цветных металлов $N_0 = 10^8$ циклов.

Предел выносливости материала значительно ниже его статической прочности при растяжении.

Ударная вязкость – это удельная, то есть отнесённая к единице площади, работа разрушения материала при приложении динамической нагрузки. Эта характеристика обозначается KC и имеет размерность Дж/см² (МДж/м²). Она определяется на образцах с надрезом. В зависимости от формы надреза (*U*- или *V*-образный) ударная вязкость обозначается соответственно KCU , KCV или KCT (*V*-образный надрез с трещиной) (рис. 2.7). Только для хрупких материалов ударная вязкость определяется на образцах без надрезов. Ударная вязкость – это интегральная характеристика, которая включает работу зарождения (KC_3) и развития трещины (KC_p):

$$KC = KC_3 + KC_p \quad (2.8)$$

Очень большое значение имеет величина KC_p , так как определяет сопротивление материала разрушению при наличии в нём трещины.

Различают хрупкое и вязкое разрушение материала. Чем выше KC_3 и особенно KC_p , тем меньше склонность материала к хрупкому разрушению. Скорость распространения трещины при хрупком разрушении достигает 2000-2500 м/с (скорость распространения звука в стали – 5030 м/с). При большой KC_p материал способен тормозить разрушение, которое уже началось. Это очень опасный вид разрушения.

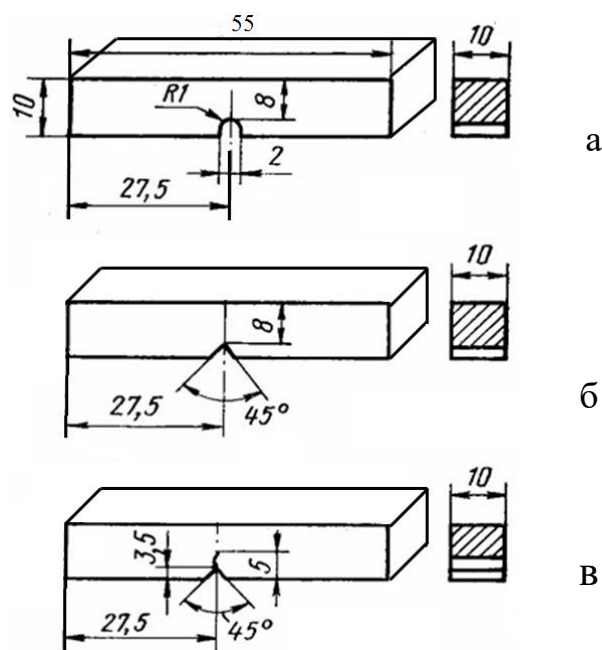


Рис. 2.7 – Схема образцов для испытаний на удар

Для большинства сталей значения ударной вязкости и её составляющих при охлаждении ниже определённой температуры резко снижаются. Материал теряет вязкость и хрупко разрушается. Это явление получило название *хладноломкости*, а температура, при которой материал охрупчивается – *порог хладноломкости* $T_{хр}$, которая определяет температурный интервал смены характера разрушения материала: вязкое разрушение (II) сменяется хрупким (I) (рис. 2.8).

Для уменьшения вероятности хрупкого разрушения рабочая температура изделия (t_3) всегда должна быть выше $t_{хр}$.

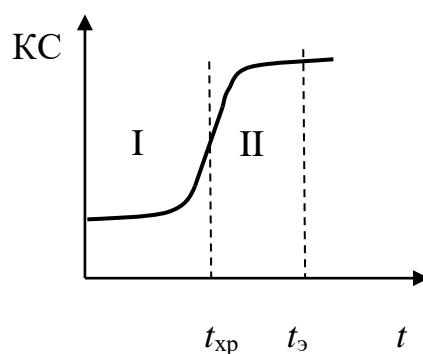


Рис. 2.8 – Зависимость ударной вязкости от температуры испытаний, T_{xp} – порог хладноломкости

Тема 2. Факторы, влияющие на механические свойства материалов

Основные вопросы темы

Химический состав. Макроструктура. Микроструктура. Атомно-кристаллическое строение металлов.

Указания к изучению темы

Существует четыре группы факторов, определяющих механические свойства материалов:

- химический состав;
- макроструктура;
- микроструктура;
- дефекты кристаллического строения.

Химический состав – важнейший фактор, влияющий на свойства материалов. Чистые металлы характеризуются, в основном, низкой прочностью и высокой пластичностью, и имеют специфические (в зависимости от металла) физические свойства: электропроводность, теплопроводность, магнитную проницаемость и др. Они применяются чаще, как электротехнические материалы.

В машиностроении главным конструкционным материалом являются металлические сплавы. Даже незначительные примеси существенно повышают прочность металлов.

Макроструктура – это строение материала, которое изучают невооруженным глазом или с помощью лупы при небольших увеличениях (до 30 раз). При исследовании макроструктуры выявляют вид излома, который позволяет судить о характере и причине раз-

рушения изделия и качественно оценить форму и размер зёрен (кристаллитов); расположение волокна в деформированном металле (в поковках, штамповках); дефекты литья и сварки (трещины, пористость, газовые пузыри); ликвацию вредных примесей (серы и фосфора); глубину упрочненного слоя после поверхностной термической и химико-термической обработки изделий.

Величина и форма зерна, сформировавшегося при первичной кристаллизации слитка, литой детали или сварного соединения, значительно влияют на свойства. Крупное зерно приводит к падению ударной вязкости и охрупчиванию. Образование зон столбчатых кристаллов, наличие ликвации негативно сказываются на свойствах.

Волокнистая структура, образовавшаяся после горячей пластической деформации, приводит к анизотропии свойств. Вдоль волокна пластичность и ударная вязкость выше, чем поперёк. Кроме того, для обеспечения надёжной работы детали, направление волокна должно соответствовать её контуру, а действующее усилие должно быть перпендикулярно волокну.

Поверхностная термическая или химико-термическая обработка могут существенно повысить твёрдость, прочность и износостойкость рабочего слоя детали.

Надо отметить, между макроструктурой и свойствами металлов и сплавов существует только качественная связь.

Микроструктура – это строение металла или сплава, которое изучают при увеличениях с помощью микроскопа.

Металлы имеют сложную микроструктуру. Они состоят из большого количества зёрен размером 20-50 мкм, разориентированных по отношению друг к другу на углы 12-15 ° (рис. 2.9). Каждое зерно состоит из субзёрен размером 3-5 мкм, также разориентированных между собой на углы от 3 до 12 °. Субзёрна состоят из блоков, которые содержат от 30 до 40 кристаллических решёток. Размер блоков 0,02-0,03 мкм с углом разориентировки $\leq 3^\circ$.

Размеры зёрен и субзёрен, угол разориентировки между ними оказывают сильное влияние на механические свойства. Чем мельче зерно и чем более сложную субструктуру оно имеет, тем выше показатели прочности, пластичности и ударной вязкости и ниже порог хладноломкости. Если измельчить зерно от 30 мкм до 3 мкм, тог σ_b

увеличится на 350 МПа, КС возрастёт ~ в 2 раза, а t_{xp} изменится от +90 °С до –100 °С.

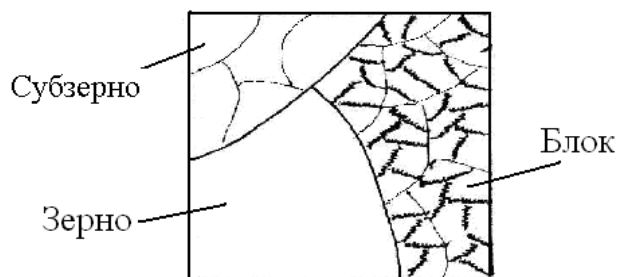


Рис. 2.9 – Схема микроструктуры металла

Микроанализ позволяет определить форму зёрен и количественно оценить их размер, выявить расположение и количество структурных составляющих и фаз, наличие микродефектов, а также неметаллических включений.

Все эти факторы оказывают большое влияние на свойства изделий.

Металлы – это поликристаллические тела, атомы которых расположены в определенном закономерном геометрическом порядке, то есть образуют правильную кристаллическую решетку. Все атомы находятся в узлах решетки и нет отклонений от их упорядоченного расположения.

В реальном металле всегда существуют дефекты кристаллического строения, которые по геометрическим признакам делятся на точечные (нульмерные), линейные (одномерные), поверхностные (двухмерные).

Точечные дефекты сосредоточены в одной точке и имеют во всех трех направлениях размеры, соизмеримые с атомом. К точечным дефектам относят вакансии, межузельные атомы, атомы основного металла и примесей.

Вакансии – это узлы решётки, в которой атомы отсутствуют (рис. 2.10, а). Атомы, которые перемещаются из узла решётки в междоузлие, называют межузельными (рис. 2.10, б). Вакансии образуются чаще всего, когда атомы из узла переходят на поверхность (могут испаряться и реже переходят в междоузлие).

Точечные дефекты влияют на некоторые физические свойства (электрическую проводимость, магнитные свойства), а также на фазовые превращения в чистых металлах. Играть определяющую роль в процессах диффузии примесных атомов в сплавах, оказывают существенное влияние не только на физические, но и на механические свойства.

Атомы примесей могут размещаться как в узлах кристаллической решётки (атомы замещения) (в), так и в междоузлиях (атомы внедрения) (рис. 2.10, б и г).

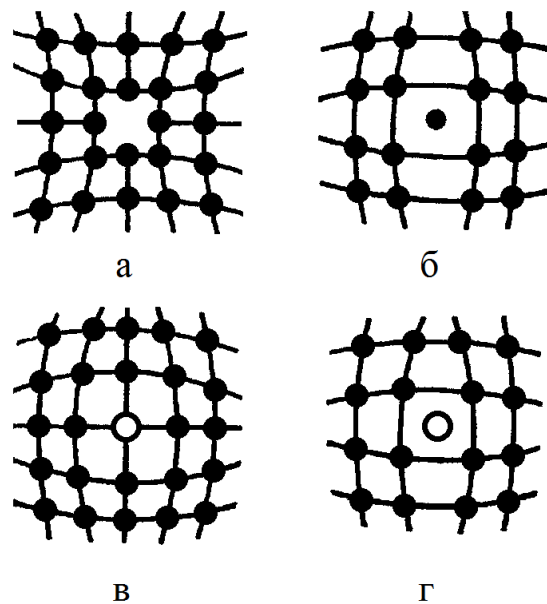


Рис. 2.10 – Схема кристаллической решетки с вакансией (а); междоузельным атомом основного металла (б); примесным атомом замещения (в) и внедрения (г)

Линейные дефекты – это дислокации (от англ. слова dislocation – сдвиг, смещение). Они имеют малые размеры в двух измерениях и значительную длину в третьем. Дислокация появляется при нарушении правильного строения кристаллической решетки за счет появления лишней оборванной полуплоскости, которую называют экстраплоскостью, или при смещении плоскостей относительно друг друга. Линия, по которой обрывается экстраплоскость, называется «дислокационная линия».

Наличие дислокаций сильно влияет на свойства металлов. При этом очень важна их способность перемещаться в кристаллической решётке под воздействием внешней силы.

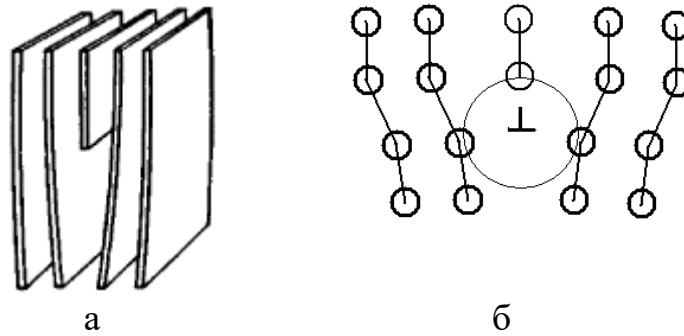


Рис. 2.11 – Кристалл с экстраплоскостью (а) и дислокация (б) в кристаллической решётке

В идеальном кристалле без дислокаций прочность определяется силами межатомного взаимодействия – это так называемая теоретическая прочность. Для железа она равна ~ 30000 МПа. Это означает, что металлическая нить диаметром 1мм^2 должна выдерживать нагрузку ~ 3 тонны. Однако в реальном железе в зависимости от количества примесей прочность находится в пределах 50-200 МПа. Реальная прочность всех металлов в сотни раз ниже теоретической, что обусловлено присутствием в них дислокаций.

Для определения теоретической прочности нужно было бы разорвать все силы межатомной связи, которые требуют очень больших усилий.

При наличии дислокаций экстраплоскость не связана с атомами нижней части кристалла и является очень подвижной. Под действием усилия она легко передвигается на одно межатомное расстояние. Каждый раз разрывается только одна связь, что требует значительно меньших усилий, чем разрыв всех связей. Этот процесс продолжается до тех пор, пока экстраплоскость не выйдет на поверхность кристалла, что приведёт к сдвигу одной части кристалла относительно другой. Дислокации облегчают процесс сдвига пластической деформации и снижают прочность.

Все реальные металлы имеют дислокации. Их количество оценивается *плотностью дислокаций* ρ , которая представляет собой общую протяженность дислокационных линий (Σl) в единице объёма V , т.е.:

$$\rho = \frac{\sum l}{V} \left[\frac{\text{см}}{\text{см}^3} \right], \text{ или } [\text{см}^{-2}] \quad (2.10)$$

В монокристаллах, которые выращивают из одного центра, $\rho \sim 10^3 - 10^4 \text{ см}^{-2}$; в поликристаллических металлах $\rho = 10^6 - 10^9 \text{ см}^{-2}$; в деформированных или упрочнённых термической обработкой поликристаллических металлах $\rho = 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Зависимость прочности от плотности дислокаций неоднозначна (рис. 2.12).

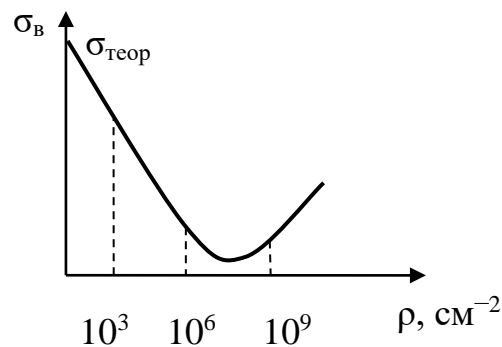


Рис. 2.12 – Взаимосвязь между прочностью и плотностью дислокаций

При увеличении плотности дислокаций и уменьшении их подвижности увеличивается прочность и снижается ударная вязкость и пластичность.

В идеальном кристалле $\rho = 0$ (нет дислокаций) и прочность его высока. С увеличением плотности дислокаций до $10^6 - 10^8$ облегчается сдвиг плоскостей кристаллов за счёт движения дислокаций и прочность снижается. При дальнейшем увеличении ρ движение дислокаций затруднено: их много и они тормозят друг друга. Как следствие – возрастает прочность, а пластичность уменьшается.

Если взаимное торможение дислокаций очень большое, то пластичность резко снижается и металл охрупчивается.

Таким образом, чтобы повысить прочность материала надо затруднить движение дислокаций. Чем мельче зерно, тем больше длина границ зёрен, тормозящих дислокации, тем выше прочность

металла. Основным препятствием для движения дислокаций являются большеугловые границы.

Для повышения пластичности необходимо облегчить движение дислокаций.

С целью обеспечения надёжной работы изделий необходимо обеспечить сопротивление хрупкому разрушению. Чтобы получить высокие значения прочности при сохранении достаточной пластичности надо иметь полупроницаемые барьеры на пути движения дислокаций. Сначала дислокации затормозятся возле препятствия – возрастает прочность. Затем к ним подойдут другие и они преодолеют барьер, двигаясь дальше. При этом повысится пластичность материала.

Препятствием для движения служат границы субзёрен, примесные атомы, мелкие частички.

Наилучшим вариантом для обеспечения сочетания прочности с достаточной пластичностью является мелкое зерно, содержащее дисперсные включения.

К поверхностным дефектам кристаллического строения относятся границы зёрен, субзёрен, блоков. Это места скопления вакансий, межузельных атомов, дислокаций, и оказывают влияние на свойства. Большеугловые границы зёрен – тормоз для движения дислокаций. При этом металл охрупчивается. Малоугловые границы блоков не препятствуют перемещению дислокаций и не обеспечивают упрочнение. Наиболее эффективными являются среднеугловые границы, которые позволяют упрочнить металл и сохранить пластичность.

Таким образом, размер зерна и состояние границ зёрен – это важнейшие факторы, которые определяют механические свойства. В настоящее время основное внимание учёных сосредоточено на получении материалов с субмикроразмерным (порядка 1 мкм) или наноразмерным (≤ 100 нм) зерном для обеспечения надёжной работы изделий.

На все механические свойства изделий очень негативно влияют объёмные, макроскопические дефекты-поры, трещины, царапины, рыхлоты и др.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое общие и специальные свойства?
2. Какие свойства относятся к механическим?
3. Назовите показатели прочности при растяжении. Как они обозначаются и в каких единицах измеряются?
4. Что характеризует собой твердость? Какие методы определения твердости Вам известны?
5. Какая связь между твердостью и прочностью?
6. Что такое усталость материала?
7. Какой показатель выносливости Вам известен?
8. Какими показателями характеризуется пластичность?
9. Что такое ударная вязкость?
10. Из каких составляющих состоит ударная вязкость?
11. Что такое порог хладноломкости?
12. Как влияет химический состав на свойства материалов?
13. Что такое макроструктура? Как она влияет на свойства?
14. Что такое микроструктура?
15. Какое строение имеет зерно поликристалла?
16. Как влияет размер зерна на механические свойства?
17. Какие дефекты атомно-кристаллического строения существуют в реальном металле?
18. На какие свойства влияют точечные дефекты?
19. Что такое дислокации? Каким показателем оценивают их количество?
20. Как плотность дислокаций и их способность к перемещению влияют на свойства?

Литература [1, с. 7-38; 2, с. 7-27]

РАЗДЕЛ 3. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Основные вопросы темы

Холодная пластическая деформация (ХПД) и её влияние на структуру и свойства. Процессы рекристаллизации при нагреве холоднодеформированного металла. Рекристаллизационный отжиг. Горячая пластическая деформация (ГПД).

Указания к изучению темы

Пластическая деформация после снятия нагрузки остается и приводит к необходимым изменениям структуры металла, а, следовательно, и его свойств.

Пластическая деформация металлов и сплавов осуществляется путем последовательного перемещения в решетке линейных дефектов – дислокаций, в результате чего происходит сдвиг одной части кристалла относительно другой.

Пластическая деформация в зависимости от температуры, при которой она осуществляется, бывает холодной (ХПД) и горячей (ГПД).

При ХПД зёрна вытягиваются и ориентируются преимущественно в направлении течения металла, образуют текстуру деформации (рис. 3.1) с анизотропией свойств, т.е. их зависимостью от направления (вдоль пластичность и ударная вязкость выше, чем поперёк). Для конструкционных материалов анизотропия механических свойств нежелательна. Но это явление полезно для электромагнитных материалов.

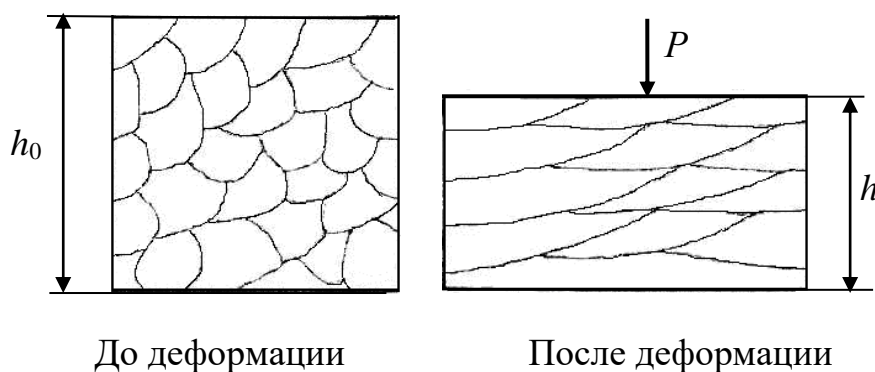


Рис. 3.1. Схема текстуры при ХПД

При ХПД возрастает количество точечных и линейных дефектов. Плотность резко повышается с 10^6 - 10^9 см⁻² перед деформацией до 10^{11} - 10^{12} см⁻² после неё.

С увеличением степени пластической деформации повышается ρ , затрудняется перемещение дислокаций и как следствие возрастают прочность и твёрдость металла, а пластичность уменьшаются (рис. 3.2). Упрочнение металла при ХПД называется *наклёпом*. Чем

больше ε , тем больше наклёп, который приводит к охрупчиванию металла.

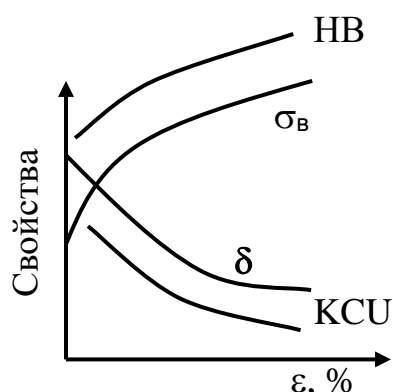


Рис. 3.2 – Влияние степени пластической деформации на свойства

Дальнейшая обработка наклепанного металла методами пластической деформации невозможна. Чтобы снять наклёп и вернуть металлу пластичность его надо нагреть. При нагреве увеличивается подвижность атомов, происходит перераспределение дефектов и уменьшение их количества, что приводит к изменению структуры и свойств металла (рис. 3.3).

В зависимости от температуры нагрева наклепанного металла происходят такие процессы: возврат, первичная рекристаллизация, собирательная рекристаллизация.

При нагреве до сравнительно невысоких температур (ниже $0,2-0,3 T_{пл}$) начинается процесс возврата, который заключается в уменьшении концентрации точечных дефектов и перераспределения дислокаций. При этом сохраняется деформированное зерно, высокая плотность дислокаций, вследствие чего механические свойства практически не изменяются.

Дальнейшее повышение температуры нагрева (выше $0,35 T_{пл}$) увеличивает подвижность атомов, приводит к существенным изменениям как структуры, так и свойств металла. При достижении определенной температуры начинается первичная рекристаллизация - образование и рост новых, равновесных зерен в деформированных зернах. Эта температура называется температурой рекристаллизации (T_p), или точнее температурным порогом рекристаллизации.

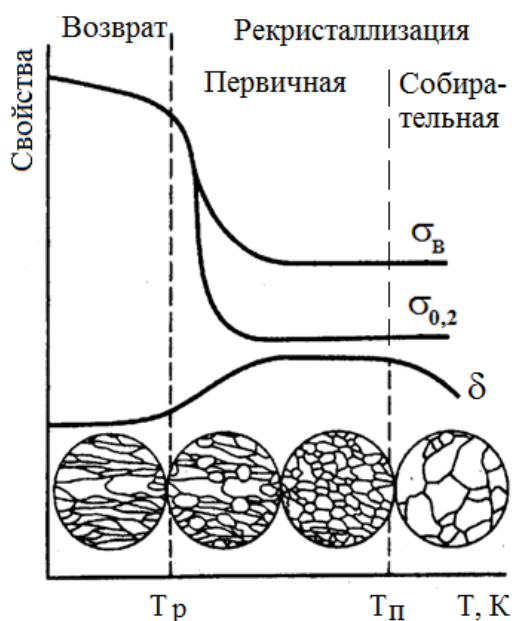


Рис. 3.3 – Изменение свойств и структуры холоднодеформированного металла при нагреве (схема): T_p – температура рекристаллизации; T_{II} – температура перегрева

При первичной рекристаллизации значительно уменьшается плотность дислокаций (с 10^{11} - 10^{12} до 10^6 - 10^8 см⁻²), полностью снимаются внутренние напряжения металла. Эти структурные изменения приводят к снятию наклёпа – уменьшается прочность и твердость и значительно повышается пластичность. Происходит разупрочнение металла.

При более высоких температурах нагрева имеет место *собирательная рекристаллизация*. Это процесс роста мелких зёрен, образовавшихся в деформированном металле при первичной рекристаллизации. Чем выше температура дальнейшего нагрева, тем крупнее зёрна. При температуре выше T_{II} имеет место явление перегрева металла, очень укрупняется зерно. При этом и прочность и пластичность уменьшаются.

Температура начала рекристаллизации связана с температурой плавления металла соотношением:

$$T_p = a \cdot T_{пл},$$

где a – коэффициент, который зависит от химического состава сплава;

$T_{пл}$ – абсолютная температура плавления, К.

Чем выше чистота металла, тем меньше коэффициент a , то есть тем ниже температура рекристаллизации. Для металлов технической чистоты $a = 0,4$, для чистых металлов $a = 0,2$, для очень сложных по химическому составу и структуре – $a = 0,8$.

Для полного снятия наклепа после холодной пластической деформации металл подвергают специальной термической обработке – рекристаллизационному отжигу. Его температура:

$$t_{po} = t_p + (100-150) \text{ } ^\circ\text{C},$$

где температура рекристаллизации t_p приведена в $^\circ\text{C}$.

Охлаждают металл на воздухе. Рекристаллизационный отжиг может быть как промежуточной операцией в процессе холодного деформирования металла, так и заключительной для восстановления пластичности с целью дальнейшей обработки.

Деформация, которая проводится при температуре ниже температуры рекристаллизации, называется *холодной пластической деформацией*, а при температуре выше температуры рекристаллизации – *горячей*.

При горячей деформации упрочнение металла устраняется за счет рекристаллизации, которая развивается непосредственно при температуре деформации и свойства металла будут близки тем, которые были до деформации.

Вопросы для самопроверки

1. Каков механизм пластической деформации?
2. Как изменяются механические свойства при холодной пластической деформации?
3. Что такое наклеп? В чём причина его возникновения?
4. Что такое текстура?
5. Как изменяются механические свойства при нагреве холоднодеформированного металла?

6. Что такое первичная рекристаллизация?
7. Что происходит на стадии собирательной рекристаллизации?
8. Как определяется температура рекристаллизации?
9. С какой целью проводится рекристаллизационный отжиг, его режим?
10. Какая пластическая деформация называется холодной, а какая – горячей?

Литература [1, с. 73-95; 2, с. 119-123]

РАЗДЕЛ 4. ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Fe-Fe₃C

Тема 1. Основные сведения из теории сплавов

Основные вопросы темы

Сплав. Компонент. Фаза. Виды фаз. Структурная составляющая.

Указания к изучению темы

Сплав – это материал, полученный сплавлением двух или более химических элементов.

Компоненты – это элементы, из которых состоит сплав. Компонентом может быть металл или неметалл или химическое соединение.

Система сплавов – совокупность сплавов, изготовленных из данных компонентов в различном их соотношении.

Фаза – это однородная по составу и строению часть сплава, отделённая от других частей поверхностью раздела, при переходе через которую свойства меняются очень резко – скачкообразно. Фазы отличаются агрегатным состоянием, химсоставом, кристаллической структурой.

Структурная составляющая – часть сплава, которая выявляется при микроскопическом исследовании по форме, травимости или цвету.

В некоторых случаях фаза и структурная составляющая совпадают, но часто структурная составляющая содержит несколько фаз.

В зависимости от физико-химического взаимодействия компонентов в твёрдом состоянии могут формироваться следующие фазы: твёрдые растворы, химические соединения, чистые компоненты, которые образуют механические смеси.

Твёрдый раствор – это фаза, при образовании которой все атомы одного компонента определённым образом расположены в кристаллической решётке другого компонента. Компонент, являющийся основой твёрдого раствора и сохраняющий свою кристаллическую решётку, называется *растворителем*. Компонент, атомы которого определённым образом располагаются в кристаллической решётке растворителя, называется *растворённым веществом*.

В зависимости от способа расположения атомов растворённого вещества в решётке растворителя различают два основных вида твёрдых растворов – *замещения* (рис. 4.1, а) и *внедрения* (рис. 4.1, б). Под микроскопом структура твёрдого раствора выглядит как структура чистого металла (рис. 4.1, в).

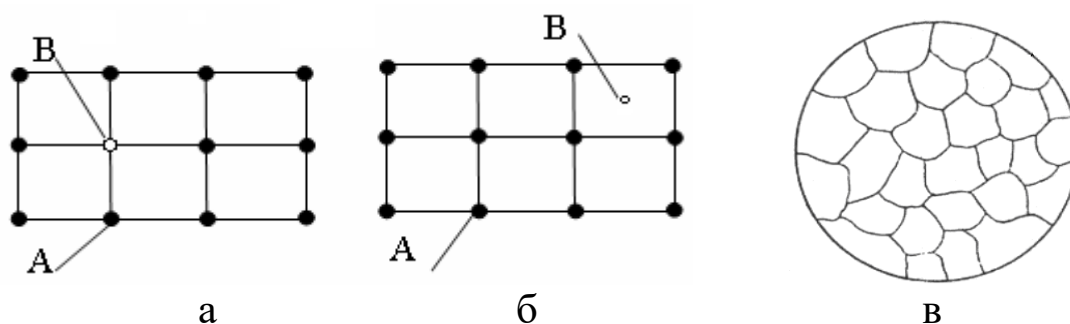


Рис. 4.1 – Схемы твёрдых растворов (А и В – компоненты) и их микроструктуры

Твёрдые растворы внедрения образуются при взаимодействии металлов с неметаллами, имеющими малый размер атомов, что позволяет им размещаться в междоузлиях решётки, – С, N, В, Н. *Твёрдые растворы замещения* образуют металлы, у которых близкие размеры атомов.

По количеству растворённого компонента в решётке растворителя твёрдые растворы делятся на растворы *ограниченной* и *неограниченной растворимости*. В твёрдых растворах с неограниченной

растворимостью – атомы растворённого вещества могут полностью заменить атомы растворителя. В сплавах с ограниченной растворимостью в решётке растворителя может разместиться только определённое количество атомов растворенного вещества.

Твёрдые растворы внедрения бывают только ограниченной растворимости и формируются в сплавах железо-углерод, а твёрдые растворы замещения могут быть ограниченной растворимости (системы Al-Si, Al-Cu) и неограниченной растворимости (системы Cu-Ni, Ag-Cu).

Роль твёрдых растворов очень существенна в железоуглеродистых сплавах.

Если компоненты сплава в твёрдом состоянии не растворяются друг в друге и не вступают в химическое взаимодействие, то каждый из них кристаллизуется отдельно, формируя собственную кристаллическую решётку. Из компонентов образуется механическая смесь (рис. 4.2). Механические смеси образуют сплавы систем Cu-Pb, Zn-Cd.

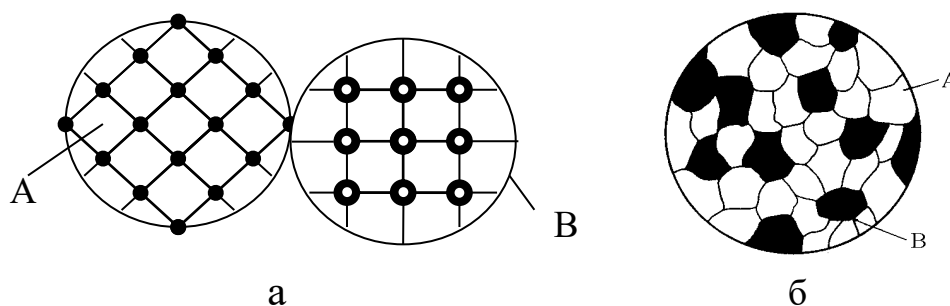


Рис. 4.2 – Атомно-кристаллическое строение (а) и микроструктура (б) механической смеси

Химическое соединение – это фаза, при образовании которой атомы одного компонента при определённом количественном соотношении вступают в химическое взаимодействие с атомами другого компонента, образуя новый тип кристаллической решётки. Каждому химическому соединению соответствует определённая химическая формула. Химическое соединение отличается высокой твёрдостью и хрупкостью. Примером химического соединения является Fe_3C , Fe_3N .

Тема 2. Диаграммы состояния

Основные вопросы темы

Понятие о диаграмме состояния. Критические точки. Диаграмма Fe – Fe₃C.

Указания к изучению темы

Процесс кристаллизации сплавов и закономерности формирования сплавов и закономерности формирования фаз и структурных составляющих изучают с помощью диаграммы состояния. Диаграмма равновесного состояния (после очень медленного охлаждения) – это графическое изображение изменений фазового состава и структуры сплавов данной системы в зависимости от концентрации компонентов и температуры.

Диаграмма состояния позволяет определить, какие фазы и структуру будет иметь сплав любого химического состава при той или иной температуре, как можно изменить микроструктуру путем термической обработки. Знания диаграмм состояния позволяют выбрать режим термической обработки.

Диаграммы играют важную роль в определении технологических и эксплуатационных свойств сплавов, которые связаны с фазовым составом и структурой сплава.

Диаграммы состояния строят на основе данных экспериментальных исследований методом термического анализа, и при этом учитывают, что любое фазовое превращение сопровождается тепловым эффектом – выделяется скрытая теплота кристаллизации.

По результатам термического анализа строят кривые охлаждения в координатах температура – время. По характерным точкам на кривых охлаждения (площадка или перегиб кривой) определяют критические температуры, при которых происходит изменение внутреннего строения сплавов (фазовые превращения).

Эти температуры называют критическими точками. Такими точками являются температуры кристаллизации (плавления при нагреве), полиморфного превращения, распада твёрдых растворов и выделения избыточных фаз.

Следует подчеркнуть, что чистые металлы, химсоединения и не-

которые сплавы определённого состава кристаллизуются при постоянной температуре и на кривых охлаждения будет площадка, соответствующая ей (рис. 4.3, а). Большинство сплавов (твёрдых растворов) кристаллизуются в интервале температур и в момент начала и конца кристаллизации на кривой охлаждения появляются перегибы и соответствующие критические точки (рис. 4.3, б).

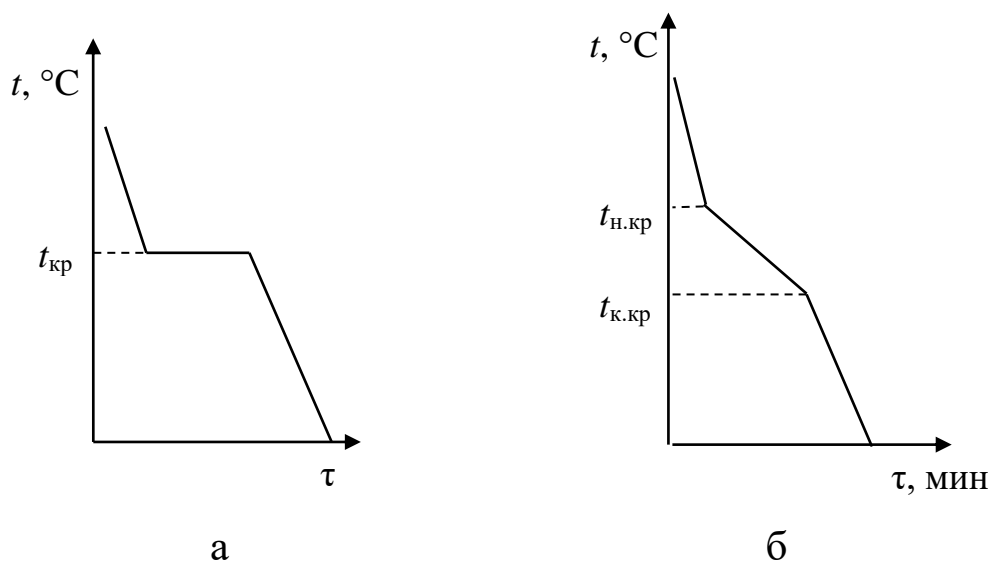


Рис. 4.3 – Кривые охлаждения чистого металла (а) и механической смеси (б)

Получаемые на кривых охлаждения критические точки для чистых металлов и сплавов различного состава переносят в систему координат температура-концентрация, соединяют плавными линиями и получают диаграмму состояния (рис. 4.4). Линии на диаграмме – это геометрические места критических точек (температур), которые разделяют области с разным фазовым составом и структурой.

Наибольшее практическое значение имеет диаграмма железо-углеродистых сплавов. Сплавы на основе железа – стали и чугуны – являются важнейшими и наиболее распространёнными конструкционными материалами в промышленности. Их объём производства составляет не менее 85 % современных технических материалов.

Основой железоуглеродистых сплавов (системы Fe-C) является железо, в котором, как известно, происходит полиморфное превращение при 911 °С. Ниже этой температуры существует Fe_{α} с решёткой объёмноцентрированного куба (оцк). Выше 911 °С решётка железа изменяется на гранецентрированную кубическую (гцк) и обозначает-

ся Fe_γ .

Вторым компонентом является углерод. Железо с углеродом образует два твёрдых раствора внедрения ограниченной растворимости (феррит и аустенит) и одно химическое соединение Fe_3C (цементит).

Феррит представляет собой твёрдый раствор углерода в Fe_α . Растворимость углерода в Fe_α невелика, при температуре $727^\circ C$ – 0,02 %. С понижением температуры растворимость углерода в Fe_α уменьшается и при комнатной температуре составляет 0,006 %. Феррит имеет низкую твёрдость (~80 НВ) и прочность (σ_B до 250 МПа), но высокую пластичность.

Аустенит – твёрдый раствор углерода в Fe_γ . Максимальная растворимость углерода в Fe_γ при температуре $1147^\circ C$ составляет 2,14 %. С понижением температуры растворимость углерода уменьшается и при $727^\circ C$ составляет 0,8 %. Это высокотемпературная фаза, которая может существовать при температуре $727^\circ C$ и выше. Аустенит твёрже и прочнее феррита (~170-200 НВ, $\sigma_B=600-800$ МПа), но пластичный и вязкий.

Цементит – это химическое соединение Fe_3C (карбид железа) с содержанием углерода 6,67 %, которое очень твёрдое (~860 НВ) и хрупкое. Пластичность его практически равна нулю.

В железоуглеродистых сплавах также образуются две структурные составляющие (механические смеси) – перлит и ледебурит. *Перлит* – это механическая смесь двух фаз – феррита и цементита, которая образуется в сталях. Перлит содержит 0,8 % углерода. *Ледебурит* – это механическая смесь перлита и цементита, он образуется в чугунах и концентрация углерода в нём 4,3 %. Обе эти механические смеси кристаллизуются при постоянной температуре.

Диаграмма Fe-C ограничивается количеством углерода 6,67 %, что соответствует 100 % Fe_3C . Сплавы с большим количеством углерода не используются, так как очень хрупкие. Поэтому диаграмму называют железо-цементит (Fe- Fe_3C), который рассматривают вторым компонентом. На диаграмме нанесены две концентрационные шкалы – массовое содержание углерода от 0 до 6,67 % и количество цементита от 0 до 100 % (рис. 4.4).

Рассмотрим критические точки, линии и фазовые превращения на диаграмме.

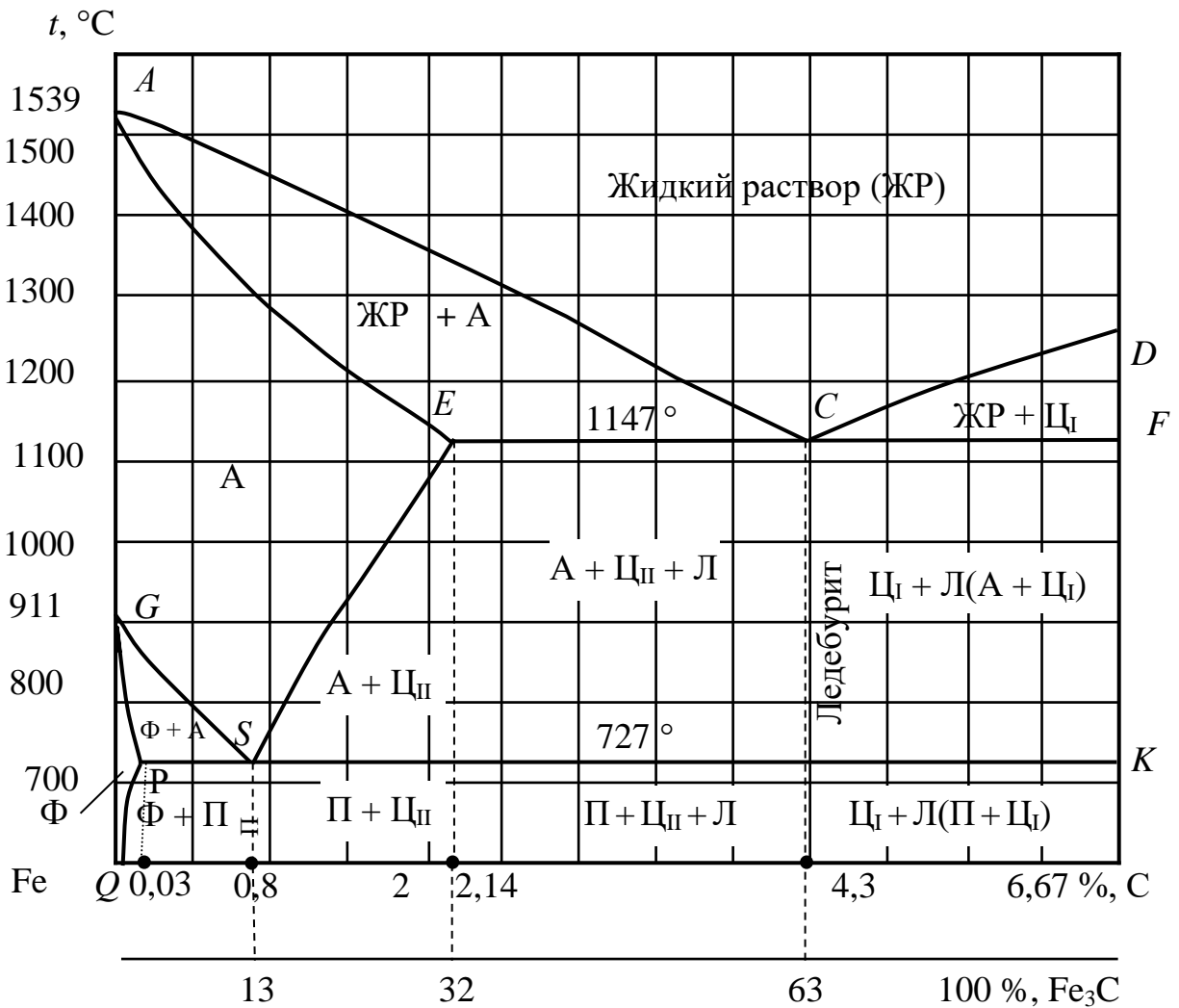


Рис. 4.4. Диаграмма состояния железо-цементит

На левой оси температур точка A ($1539\text{ }^{\circ}\text{C}$) – это температура плавления чистого железа, а на правой – точка D ($1252\text{ }^{\circ}\text{C}$) – температура плавления цементита.

Разделим абсциссу на 3 части, которые соответствуют содержанию углерода $0,8\%$, $2,14\%$ и $4,3\%$. Проведём штриховые вертикальные линии из точек, в которых $C = 2,14\%$ и $C = 4,3\%$, до температуры $1147\text{ }^{\circ}\text{C}$ и проведем горизонталь ECF . Теперь соединим линиями точки A , C и D , и точку A с E . Мы построили верхнюю часть диаграммы, которая отвечает первичной кристаллизации (из жидкого состояния). ACD – линия ликвидуса – начало кристаллизации, $AECF$ – линия солидуса – конец кристаллизации. Ниже этой линии сплавы будут в твёрдом состоянии. При температурах ниже линии AC из жидкого раствора начинает выделяться аустенит, так

как при этих температурах существует Fe_γ . Ниже CD выделяется цементит, который называют первичным (C_I).

Точка C – это эвтектическая точка, отвечающая концентрации углерода 4,3 %. Во время кристаллизации сплава такого состава при температуре 1147 °С из жидкости будут одновременно выделяться кристаллы аустенита и цементита, образуя эвтектику ($A+C_I$), которая называется ледебурит.

Ледебурит (L) – это однородная механическая смесь аустенита и цементита, формирующаяся при постоянной температуре из жидкого раствора и содержащая 4,3 % C .

Линия ECF (1147 °С) – эвтектическая горизонталь. При такой температуре все сплавы с концентрацией углерода более 2,14 % заканчивают кристаллизацию образованием эвтектики – ледебурита.

Сплавы с содержанием углерода от 2,14 % до 4,3 % непосредственно ниже линии EC состоят из аустенита и ледебурита. Аустенит выделяется из жидкого металла в интервале температур между ликвидусом и солидусом, а ледебурит формируется при температуре 1147 °С (на эвтектической горизонтали EC).

В сплавах с концентрацией более 4,3 % C , первичная кристаллизация также заканчивается формированием ледебурита, и структура этих сплавов ниже 1147 °С состоит из ледебурита и первичного цементита, который выделился ранее из жидкого раствора между линиями CD и CF .

В железоуглеродистых сплавах структурные изменения происходят и в твёрдом состоянии (вторичная кристаллизация). Они обусловлены полиморфным превращением железа и уменьшением растворимости углерода в твёрдых растворах (аустените и феррите) с понижением температуры.

После первичной кристаллизации сплавы с содержанием углерода менее 2,14 % имеют структуру аустенита. Точка E соответствует максимальной растворимости углерода в аустените – 2,14 % при 1147 °С. С понижением температуры растворимость углерода в аустените уменьшается по линии ES и при 727 °С достигает 0,8 % (точка S). Это максимальное количество углерода, которое может раствориться в аустените при температуре 727 °С. Линия ES – это линия ограниченной растворимости углерода в Fe_γ при температу-

рах 727–1147 °С. Избыточный углерод соединяется с железом и образует цементит вторичный (он выделяется из твёрдой фазы аустенита). В сплавах с концентрацией углерода от 2,14 % до 4,3 % из аустенита ниже 1147 °С и до 727 °С также будет выделяться цементит вторичный и структура представляет собой А+Ц_{II}+Л.

Если бы в железе не происходило при охлаждении $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение, линия *ES* доходила бы до комнатной температуры. Но вследствие этого преобразования появляется нижняя часть диаграммы.

Точка *G* – это температура полиморфного превращения железа – 911 °С. При добавлении к железу углерода (в сплавах) начало $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения понижается по линии *GS*. Ниже этой линии в структуре появляется феррит. Линия *GS* – это линия начала превращения аустенита в феррит.

Для сплавов с содержанием углерода менее 0,03 % (т. *P*) это превращение заканчивается на линии *GP*. В сплавах с количеством углерода от 0,03 до 0,8 % – на линии *PSK* при 727 °С.

Ниже 727 °С аустенит в равновесном состоянии не существует.

При температурах ниже линии *GP* сплавы имеют структуру чистого феррита с максимальным содержанием углерода 0,3 % при 727 °С. Феррит (как и аустенит) – твёрдый раствор ограниченной растворимости. С понижением температуры растворимость углерода в Fe_α уменьшается по линии *PQ* и при комнатной температуре в т. *Q* достигает 0,006 %. Линия *PQ* – это линия ограниченной растворимости углерода в Fe_α .

Как видно на диаграмме, в сплаве, содержащем 0,8 % (точка *S*), при охлаждении из аустенита образуется перлит. *Перлит* – это *эвтектоид* – механическая смесь феррита и цементита, одновременно выделяющихся из аустенита при постоянной температуре 727 °С. Концентрация углерода в перлите 0,8 %. Точка *S* – эвтектоидная точка. Линия *PSK* – *эвтектоидная горизонталь*.

Разница между эвтектикой и эвтектоидом заключается в том, что эвтектика формируется из жидкого раствора, а эвтектоид – из твёрдого, в данном случае, из аустенита.

При 727°C во всех сплавах завершается полиморфное превращение и аустенит превращается в перлит ($\Phi + \text{ЦII}$).

Структура сплавов с содержанием углерода менее $0,8\%$ состоит из перлита и феррита, который раньше выделяется из аустенита и продолжает охлаждаться. Сплав с концентрацией углерода $0,8\%$ имеет структуру перлита. У сплавов с содержанием углерода от $0,8\%$ до $2,14\%$ структура – перлит и цементит, который выделялся раньше из аустенита.

Если в сплавах углерода от $2,14\%$ до $4,3\%$ структура – перлит, ледебурит и цементит вторичный. Сплав, содержащий $4,3\%$ углерода, имеет структуру ледебурита. При содержании углерода более $4,3\%$ структура сплавов – ледебурит и цементит первичный, который образовался из жидкости при 1147°C и продолжает остывать.

Чем больше в сплаве углерода, тем больше цементита в его структуре. Так, перлит с $0,8\%$ C содержит 13% цементита, а ледебурит с $4,3\%$ C – 63% .

Тема 3. Углеродистые стали и чугуны

Основные вопросы

Структура и свойства углеродистых сталей. Белые и графитизированные чугуны.

Указания к изучению темы

Сплавы с содержанием углерода меньше $2,14\%$ называются сталями. Стали в зависимости от содержания углерода делятся на:

- доэвтектоидные: $C < 0,8\%$; структура – феррит+перлит;
- эвтектоидная: $C = 0,8\%$; структура – перлит;
- заэвтектоидные: $C > 0,8\%$, структура – перлит+цементит в виде сетки по границам зёрен перлита.

На рис. 4.5 представлены стали с разным содержанием углерода.

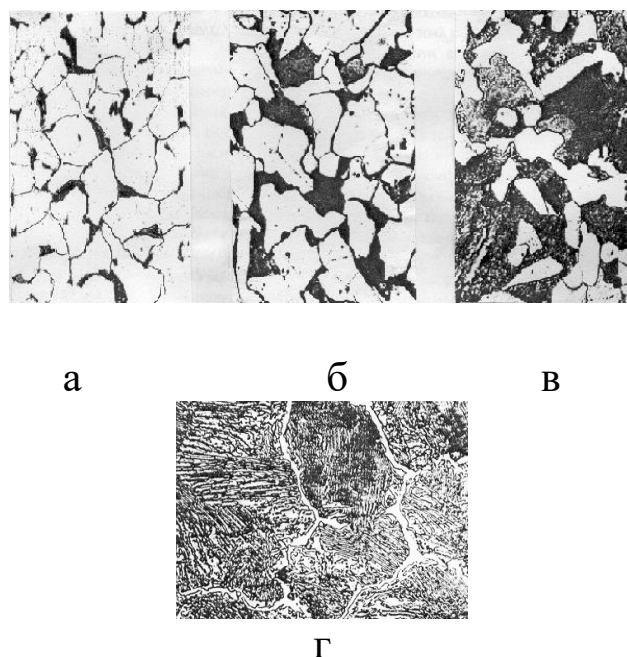


Рис. 4.5. Структура сталей: а – с содержанием углерода 0,2 %; б – 0,4%; в – 0,6 %; г – 1,2 %, $\times 450$ (светлые зёрна – феррит, тёмные – перлит)

Структура доэвтектоидной стали с увеличением содержания углерода будет отличаться количественным соотношением феррита и перлита, а заэвтектоидной – количеством свободного цементита. Структуры сталей разные, но фазовый состав одинаков – это феррит и цементит.

С увеличением количества углерода возрастет количество твёрдого и хрупкого цементита в структуре. Сталь становится более прочной и твёрдой, но её пластичность и ударная вязкость снижаются.

Углеродистые доэвтектоидные стали более пластичные при достаточной прочности и являются конструкционными. Заэвтектоидные стали менее пластичные, но более твёрдые и используются в качестве инструментальных.

Сплав железа с углеродом при его содержании $> 2,14\%$ – это чугун.

Диаграмма Fe-Fe₃C отражает белые чугуны, в которых весь углерод находится в виде цементита (Fe₃C).

В зависимости от содержания углерода белые чугуны делятся на:

- доэвтектические: C $< 4,3\%$; структура – перлит+цементит+ледебурит;

- эвтектические: $C=4,3 \%$; структура – ледебурит;
- заэвтектические: $C>4,3 \%$; структура – ледебурит+цементит.

Структурные составляющие чугунов разные, но фазовый состав одинаков – феррит (входит в состав перлита) и цементит. В белых чугунах много цементита ($>32 \%$ в зависимости от содержания углерода) и они очень хрупкие и имеют крайне ограниченное промышленное применение.

При определённых условиях выплавки могут быть получены графитизированные чугуны (углерод в которых находится в свободном состоянии в виде графита различной формы). Эти чугуны нашли широкое применение в машиностроении для изготовления деталей машин.

В зависимости от формы графита, которая обуславливается способом производства, различают серые, ковкие и высокопрочные чугуны.

В серых чугунах (СЧ) углерод находится в виде графита пластинчатой формы (рис. 4.6, а). Такой формы графит получают при определённом соотношении кремния и углерода. Маркируется серый чугун следующим образом: СЧ15, СЧ20 (ГОСТ 1412-87). Буквы обозначают принадлежность к серому чугуну, цифры показывают минимальное временное сопротивление (предел прочности) в $\text{МПа} \cdot 10^{-1}$. Например, чугун марки СЧ15 имеет $\sigma_B=150 \text{ МПа}$.

Шаровидный графит, который получают модифицированием чугуна церием или магнием, имеет высокопрочный чугун (рис. 4.6, б). Маркируется высокопрочный чугун: ВЧ350–22, ВЧ400–15...ВЧ1000–2 (ДСТУ 3925-99). Буквы обозначают принадлежность к высокопрочному чугуну, первые числа (до дефиса) показывают минимальное значение σ_B в МПа, а число через дефис – минимальное относительное удлинение δ в процентах. Например, чугун марки ВЧ 350–22: $\sigma_B=350 \text{ МПа}$, $\delta=22 \%$.

Хлопьевидный графит ковкого чугуна (рис. 4.6, в) получают длительным отжигом белого чугуна. Маркируют ковкие чугуны буквами КЧ и цифрами, первые две цифры показывают σ_B в $\text{МПа} \cdot 10^{-1}$ (ГОСТ 1215–79). Другие две или одна – относительное удлинение δ в процентах. Например, чугун марки КЧ300–6: $\sigma_B=300 \text{ МПа}$, $\delta=6\%$.

Металлическая основа (матрица) чугунов может быть ферритной, феррито-перлитной и перлитной. Это зависит от количества углерода, оставшегося в аустените после выделения при кристаллизации графита.

Если в аустените $<0,8\%$ С, то формируется ферритно-перлитная матрица. При содержании в аустените $0,8\%$ С матрица будет перлитной (рис. 4.6, а). В случае выделения всего углерода в виде графита матрица чугуна имеет ферритную структуру (рис. 4.6, в).

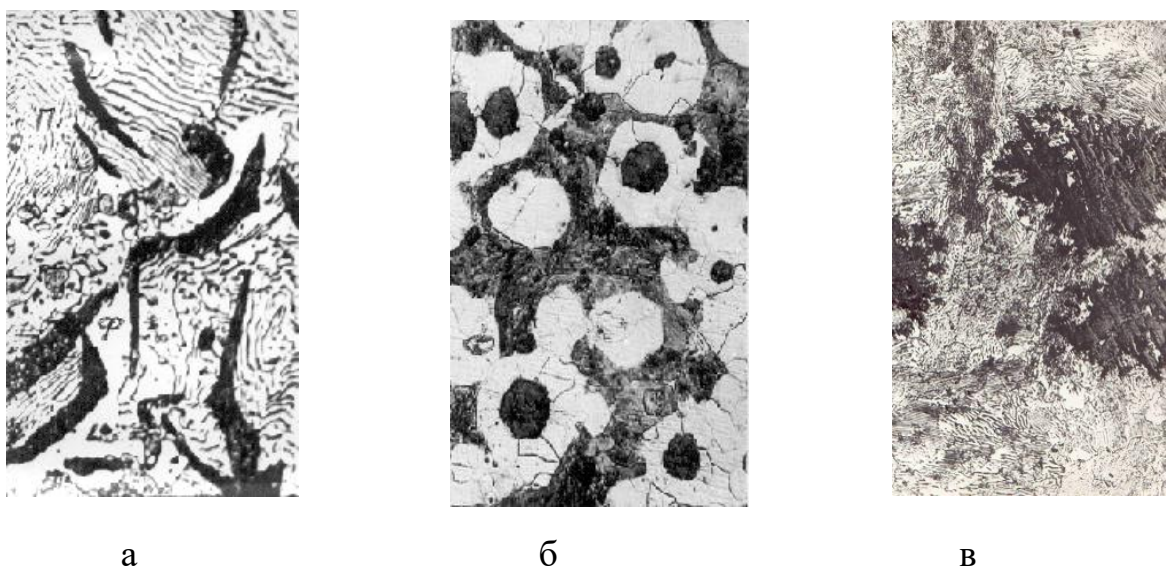


Рис. 4.6. Графитизированные чугуны: а – серый перлитный чугун с пластинчатым графитом; б – ферритно-перлитный ковкий чугун с хлопьевидным графитом; в – высокопрочный ферритный чугун с шаровидным графитом, $\times 450$

Свойства чугунов зависят как от структуры металлической основы, так и от формы, размеров и количества графита. Свойства матрицы определяются соотношением перлита и феррита. При одинаковом количестве графита перлитная матрица обеспечивает более высокие прочность и твёрдость чугуна. При одинаковой металлической основе, чем меньше включений графита и чем они мельче, тем выше прочность чугуна.

Очень сильно влияет на свойства форма графита. Наиболее высоким уровнем механических свойств обладают высокопрочные чугуны с компактной формой графита, так как шаровидные вклю-

чения являются в наименьшей степени концентраторами напряжений. Наиболее сильно расчленяет металлическую матрицу графит пластинчатой формы. Поэтому независимо от металлической основы пластичность серых чугунов близка к нулю.

Графитизированные чугуны широко используются во всех отраслях производства: строительстве, металлургической промышленности, станкостроении, в автомобильном и сельскохозяйственном машиностроении.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое сплав, компонент сплава?
 2. Дайте определение фазе, структурной составляющей.
 3. Какие существуют типы взаимодействий компонентов сплавов?
 4. Какие фазы образует железо с углеродом? Дайте им определение.
 5. Что такое эвтектика и эвтектоид?
 6. Дайте определение ледебуриту.
 7. Что такое перлит? феррит? аустенит?
 8. Как делятся углеродистые стали в зависимости от содержания углерода?
 9. Какова структура сталей с разным содержанием углерода при комнатной температуре?
 10. Как изменяются свойства стали с повышением содержания углерода?
 11. Какие чугуны относятся к белым, а какие – к графитизированным?
 12. Что такое серый чугун и как он маркируется?
 13. Какая форма графитных включений в высокопрочном чугуне и как он маркируется?
 14. Что такое ковкий чугун? Приведите примеры маркировки.
- Литература [1, с. 117-144; 2, с. 72-84]

РАЗДЕЛ 5. УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ

Основные вопросы темы

Стали обыкновенного качества. Стали качественные. Автоматные стали. Углеродистые инструментальные стали. Маркировка. Области использования.

Указания к изучению темы

На углеродистые стали приходится ~ 85% от общего объема производства сталей. Эти стали дешевые, сочетают удовлетворительные механические свойства (σ_v до 1000 МПа при достаточной прочности и ударной вязкости) с хорошими технологическими показателями (легко обрабатываются резанием и давлением).

По содержанию углерода стали разделяют на низкоуглеродистые (<0,3 % С), среднеуглеродистые (0,3-0,5 % С) и высокоуглеродистые (более 0,6 % С).

По качеству стали делятся на стали обыкновенного качества (в них S не более 0,06 %, а P ≤ 0,045 %), качественные (S и P ≤ 0,035 %) и высококачественные (S и P ≤ 0,025 %). В основу этой классификации положено содержание вредных примесей – серы и фосфора.

По назначению углеродистые стали делятся на конструкционные и инструментальные.

При производстве сталей *обыкновенного качества* (ДСТУ 2657-94 или ГОСТ380-88) не предъявляются высокие требования к шихте, процессам плавки и разливки. В результате этого стали содержат большое количество вредных примесей: серы и фосфора – ~0,055 и 0,045 % соответственно. Стали имеют, кроме того, повышенное содержание неметаллических включений. Эти стали самые дешёвые.

Стали маркируют буквами и цифрами: Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6. Буквы «Ст» обозначают сталь, а цифры – порядковый номер марки стали. Чем больше номер, тем больше количество углерода, тем выше прочность, а пластичность ниже.

Если в стали есть буквы кп, сп и пс – это кипящая (Ст1кп), спокойная (Ст3сп) или полуспокойная (Ст4пс) сталь. Буква Г в марке означает содержание ~1 % марганца (Ст5Г).

Из сталей обыкновенного качества изготавливают горячекатаный прокат: балки, швеллеры, уголки, прутки, а также листы, трубы, поковки, а также детали не очень ответственного назначения. Стали марок Ст5 и Ст6 используют для изготовления корпусных деталей, кронштейнов, фланцев, крышек, рукояток, стопоров, упоров, панелей электрооборудования автомобилей. Из сталей Ст1-Ст4 изготавливают болты, гайки, шайбы.

Качественные стали (ГОСТ 1050-88) выплавляют с соблюдением более строгих требований в отношении состава шихты и ведения плавки и разливки. К ним предъявляются также высокие требования по химическому составу: серы и фосфора не более 0,03-0,035% и количество неметаллических включений.

Качественные стали маркируют словом «сталь» и цифрами 08, 10, 15, 20...85, которые указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Например, сталь 08 (0,08 %С), сталь 45 (0,45% С).

Низкоуглеродистые стали 10, 15, 20, 25 обладают невысокой прочностью и высокой пластичностью. Их используют для малонагруженных деталей и сварных соединений. Из тонколистовых сталей 08кп, 08Ю (Ю – добавка алюминия) методом холодной штамповки с глубокой вытяжкой изготавливают кузова автомобилей и тракторов.

Среднеуглеродистые стали 30, 35, 40, 45, 50 после соответствующей обработки имеют высокий комплекс свойств – прочности, пластичности и вязкости, малочувствительны к концентраторам напряжений. Они широко используются во всех отраслях машиностроения для ответственных деталей машин (коленчатых, распределительных и карданных валов, осей, шатунов, шестерен, валов коробки передач и др.).

Стали с высоким содержанием углерода (ГОСТ 14959-79) 60, 65, 70, 80 и 85 обладают после определённой термической обработки повышенной прочностью, износостойкостью и высокими упругими свойствами. Из этих сталей изготавливают пружины и рессоры.

ры, тросы, торсионные валы. Эти стали относятся к группе рессорно-пружинных.

Автоматные стали или стали повышенной обрабатываемости резанием (ГОСТ 1414-75) предназначены для изготовления деталей массового производства на станках автоматах с большой скоростью резания. Эти стали должны иметь хорошую обрабатываемость резанием. Для этого необходима ломкая стружка, легко отделяющаяся от поверхности детали, что повышает стойкость инструмента. С этой целью стали легируют охрупчивающими элементами – серой (0,3 %) и фосфором (~0,15 %). Стали маркируют буквой А и цифрами, указывающими содержание углерода в сотых долях процента, – А12, А20, А30.

Для уменьшения хрупкости и увеличения скорости резания в сталь добавляют 0,15-0,3 % свинца и маркируют их АС14, АС40 (цифры – это 0,14 и 0,4 % С соответственно).

Стали с кальцием (~0,003 %) увеличивают стойкость инструмента в 2-3 раза при значительном увеличении скорости обработки. Их маркируют АЦ20, АЦ40 (Ц – кальций, цифры – содержание углерода).

Примеси, улучшающие обрабатываемость стали, существенно снижают её конструкционную прочность, поэтому их применяют для изготовления крепежа (болты, винты, гайки, шурупы), а также неотчетственных деталей (оси, валики, втулки, кольца и др.).

Дешёвые стали с высоким содержанием серы (до 0,3 % S, до 0,15% Р) А12 (0,12 % С), А20 (0,2 % С), А40Г (0,4 % С) и повышенным содержанием марганца (1,2-1,55 % Mn) применяются для изготовления крепежа.

Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435-74) делятся на две группы: качественные стали – У7, У8...13 (S и Р ≤ 0,035 %) и высококачественные стали (S и Р не более 0,02 %) – У7А...У13А, на что указывает буква А в конце марки. Цифра означает среднее содержание углерода в десятых долях процента (от 0,7 до 1,3 %).

Эти стали нельзя использовать при обработке изделий с большой скоростью резания или с твёрдой поверхностью. Так как при нагреве инструмента выше 200 °С он теряет свою твёрдость. Поэтому из этих сталей изготавливают, главным образом, слесарный

инструмент. Стали У7, У8 используют для молотков, зубил, отвёрток, кернов. Из У9-У13 изготавливают напильники, ножовки, бритвы, мелкоразмерные свёрла, т.к. они более твёрдые и хрупкие и не могут работать при ударных нагрузках.

Вопросы для самопроверки

1. На какие группы делятся стали в зависимости от содержания углерода?
2. На какие группы делятся стали по назначению?
3. Как маркируются углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества? Приведите пример.
4. Какое смысловое значение имеют цифры при маркировке качественных конструкционных сталей?
5. В чем отличие конструкционных сталей обыкновенного качества от качественных?
6. В чем особенности химического состава сталей повышенной и высокой обрабатываемости резанием?
7. Как маркируются стали повышенной и высокой обрабатываемости резанием?

Литература [1, с. 149-154; 2, с. 76-80]

РАЗДЕЛ 6. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Тема 1. Основы термической обработки стали

Основные вопросы темы

Критические точки. Превращения при охлаждении. С-образные диаграммы.

Указания к изучению темы

Термическая обработка заключается в нагреве стали до определённой температуры, выдержке при этой температуре и охлаждении с определённой скоростью.

Цель термообработки – получить требуемую структуру для обеспечения нужных эксплуатационных свойств.

Для формирования необходимой структуры должны произойти фазовые превращения при температурах, которые определяют критические точки. Их обозначают A_1 и A_3 . Точка A_1 соответствует линии PSK , A_3 – линии GSE . Для эвтектоидной стали (0,8 % С) точки совпадают (A_{c1} и A_{c3}).

Если сплав нагревают, то в обозначении добавляют индекс «с»: A_{c1} , A_{c3} , при охлаждении – «г»: A_{r1} , A_{r3} .

На отрезке линии SE точку A_3 обозначают A_{cm} .

Критические точки используют для назначения режима термической обработки.

Рассмотрим процессы нагрева и охлаждения для эвтектоидной стали с 0,8 % С. При нагреве выше 727 °С начинает образовываться из перлита устойчивый аустенит. *Перлит* – механическая смесь феррита и цементита, аустенит – однородный твёрдый раствор. Осуществляется превращение:



В основе этого процесса лежит полиморфное превращение $Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$ и перераспределение углерода (растворение карбидов в аустените).

Нагревать сталь надо до температуры на 50-70 °С выше точки $A_{c1,3}$. При недогреве будет неоднородный по углероду аустенит и после охлаждения стали получим неоднородные свойства. В случае перегрева происходит рост зерна аустенита и охрупчивание стали.

Основные свойства стали определяются структурой, получаемой при охлаждении. Рассмотрим процессы, которые происходят при охлаждении стали. Для изучения кинетики распада аустенита пользуются экспериментально построенными диаграммами изотермического превращения аустенита (С-образными диаграммами).

На рис. 6.1 представлена диаграмма, которая показывает кинетику распада аустенита в процессе выдержки при разных температурах ниже 727 °С.

Выше 727 °С аустенит устойчив и не распадается при любом времени выдержки. Ниже 727 °С он существует в течение времени, ограниченного С-кривой начала распада и называется *неустойчивым*. Время до начала распада аустенита – это *инкубационный пери-*

од. Длительность его характеризует устойчивость переохлаждённого аустенита.

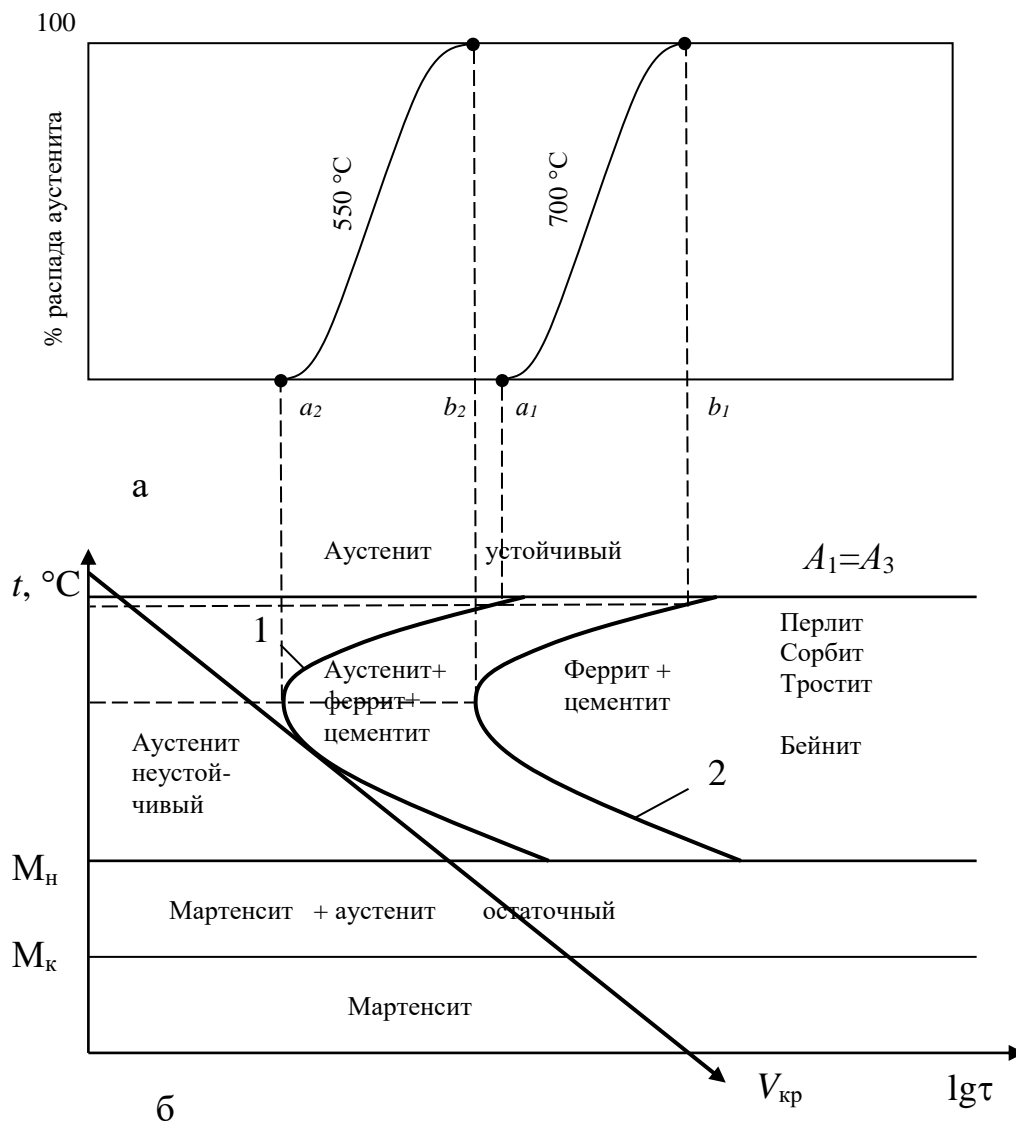


Рис. 6.1 – Диаграмма изотермического распада аустенита для эвтектоидной стали (0,8 % С)

Свойства и строение продуктов превращения аустенита зависят от температуры, при которой происходит его распад.

Выше изгиба С-кривых осуществляется перлитное превращение. Продукты перлитного превращения имеют пластинчатое строение и различаются лишь степенью дисперсности феррита и цементита. При высоких температурах, т.е. при малых степенях переохлаждения, получается перлит – достаточно грубая смесь феррита и цементита, характеризующаяся большим межпластинчатым расстоянием $\Delta_0=0,6-1,0$ мкм (рис. 6.2, а). С понижением температуры и,

следовательно, с увеличением переохлаждения пластины измельчаются и межпластинчатое расстояние уменьшается – формируются структуры сорбит ($\Delta_0=0,25-0,30$ мкм) (рис. 6.2, б), тростит ($\Delta_0=0,1-0,15$ мкм) (рис. 6.2, в). С увеличением степени дисперсности феррито-цементитной смеси все её свойства возрастают. В частности, твёрдость перлита составляет 150-200 НВ, сорбита – 250-300 НВ, тростита – 350-450 НВ.

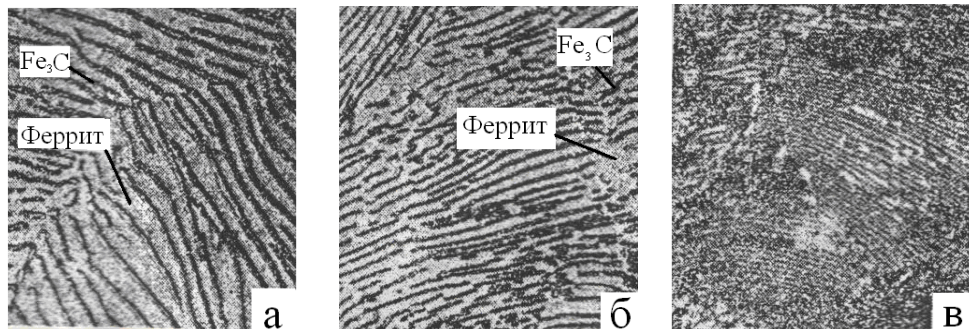


Рис. 6.2 – Структуры феррито-цементитного класса: а – перлит, б – сорбит, в – тростит

Ниже температуры, соответствующей минимальной устойчивости аустенита, происходит бейнитное превращение. *Бейнит* представляет собой игольчатую структуру, состоящую из несколько пересыщенного углеродом феррита и частиц цементита. Бейнит прочнее продуктов перлитного превращения (450-500 НВ).

При переохлаждении аустенита до температуры, равной или ниже критической точки M_n – горизонтальная линия, показывающая температуру начала бездиффузионного мартенситного превращения (для эвтектоидной стали 240 °С), диффузионные процессы полностью подавляются и образование структуры, состоящей из феррита и цементита, становится невозможным. В этом случае происходит бездиффузионное превращение аустенита в *мартенсит* – пересыщенный твёрдый раствор углерода в Fe_α (рис. 6.3). Если в равновесном состоянии растворимость углерода в Fe_α при 20 °С не превышает 0,006 %, то его содержание в мартенсите может быть таким же, как в исходном аустените. Атомы углерода сильно искажают ОЦК решётку. Мартенсит имеет тетрагональную решётку, в кото-

рой один период h больше другого a . При увеличении содержания углерода высота тетрагональной призмы увеличивается, а размеры её основания уменьшаются. Следовательно, чем больше в мартенсите углерода, тем больше степень тетрагональности решётки h/a .

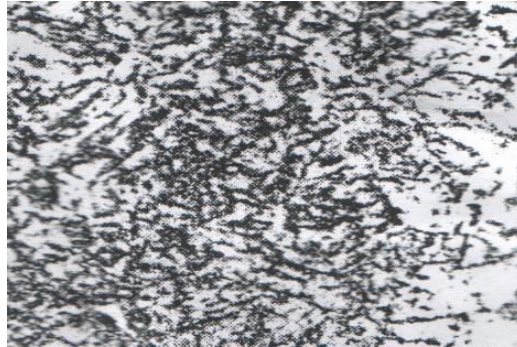


Рис. 6.3 – Структура мартенсита

Высокая твёрдость мартенсита (600 НВ) объясняется тем, что:

- объём мартенсита больше объёма аустенита;
- происходит дробление блоков;
- возрастает плотность дислокаций.

Особенности мартенситного превращения:

- превращение идёт только при непрерывном охлаждении;
- для полного превращения в мартенсит аустенит должен быть охлаждён до температуры ниже конца мартенситного превращения M_k ;

- положение критических точек M_n и M_k не зависит от скорости охлаждения и обусловлено химическим составом аустенита: чем больше в аустените углерода и легирующих элементов (кроме кобальта и алюминия), тем ниже температура M_n и M_k .

Мартенсит может образовываться из аустенита только при определённых условиях охлаждения – со скоростью критической и больше (рис. 6.1). *Критическая скорость* соответствует наименьшей скорости, с которой образуется чисто мартенситная структура (без диффузионного распада). Графически эта скорость выглядит касательной к линии, соответствующей началу распада аустенита.

Введение в сталь легирующих элементов уменьшает критическую скорость, смещая С-образные кривые вправо за счёт увеличения устойчивости переохлаждённого аустенита. Такое влияние ле-

гирующих элементов позволяет производить закалку легированных сталей в масле, тогда как углеродистые стали, имеющие более высокие критические скорости, необходимо каливать в воде.

Тема 2. Виды термической обработки

Основные вопросы темы

Отжиг. Нормализация. Закалка. Отпуск.

Указания к изучению темы

Отжиг и нормализация

Основными видами термической обработки являются: отжиг, нормализация, закалка, отпуск. Основные факторы воздействия при термической обработке – температура и время.

Отжиг и нормализацию обычно применяют как предварительные операции термической обработки заготовок с целью устранения дефектов предыдущей горячей обработки и подготовки структуры к последующим технологическим операциям. Однако отжиг и нормализация могут быть и окончательной термической обработкой в том случае, если обеспечивают удовлетворительные эксплуатационные свойства детали.

Отжиг – это термическая обработка, которая заключается в нагреве до температуры выше критической, выдержке при этой температуре и последующем очень медленном охлаждении вместе с печью.

Медленное охлаждение приводит к распаду аустенита и превращению его в перлитные структуры. Отжиг – это разупрочняющая термическая обработка, в результате которой повышается пластичность, снижаются твёрдость и остаточные напряжения, устраняются последствия ликвации – повышается однородность в распределении химических элементов по сечению отливки, повышается однородность структуры, улучшается обрабатываемость резанием.

Отжиг проводят при температуре нагрева: $t_{\text{H}} = A_{\text{C3}} + (30-50)^\circ\text{C}$.

Нормализация представляет собой операцию нагрева до температуры на 50-70°С выше A_{c3} , выдержки при этой температуре и последующего охлаждения на воздухе. Нормализация вызывает полную фазовую перекристаллизацию сплава.

Свойства низкоуглеродистой стали после отжига и нормализации примерно одинаковы, поэтому предпочтение следует отдать последней, как более экономичной.

Закалка стали

Закалка – это термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали до температур, превышающих критические, выдержке при этих температурах для завершения фазовых превращений и охлаждении со скоростью выше критической. Закалка – это упрочняющая термическая обработка, в результате которой в стали формируется структура мартенсита.

Доэвтектоидные стали нагревают под закалку до температуры $t_H = A_{c3} + (30-50)^\circ\text{C}$. В этом случае сталь с исходной структурой феррит+перлит приобретает аустенитную структуру, которая при последующем охлаждении со скоростью выше критической превращается в мартенсит (рис. 6.4).

Заэвтектоидные стали под закалку нагревают до температуры $t_H = A_{c1} + (50-60)^\circ\text{C}$, в результате чего образуется аустенит при сохранении некоторого количества вторичного цементита. После охлаждения со скоростью выше критической структура состоит из мартенсита и цементита, обладающих высокой твёрдостью и износостойкостью.

Нагрев под закалку производят в воздушной среде (это вызывает обезуглероживание поверхностного слоя), в защитной газовой атмосфере, в расплаве солей.

Выдержка при температуре нагрева определяется размерами детали и средой, в которой производится нагрев. Общая продолжительность выдержки при температуре нагрева определяется на заводах опытным путём.

В процессе закалки сталь следует охлаждать со скоростью выше критической. Величина критической скорости закалки определяется химическим составом стали: поэтому для углеродистых

сталей, имеющих большую критическую скорость, в качестве охлаждающей среды используют воду, а для легированных сталей, имеющих меньшую критическую скорость охлаждения, минеральные масла, растворы солей и щелочей.

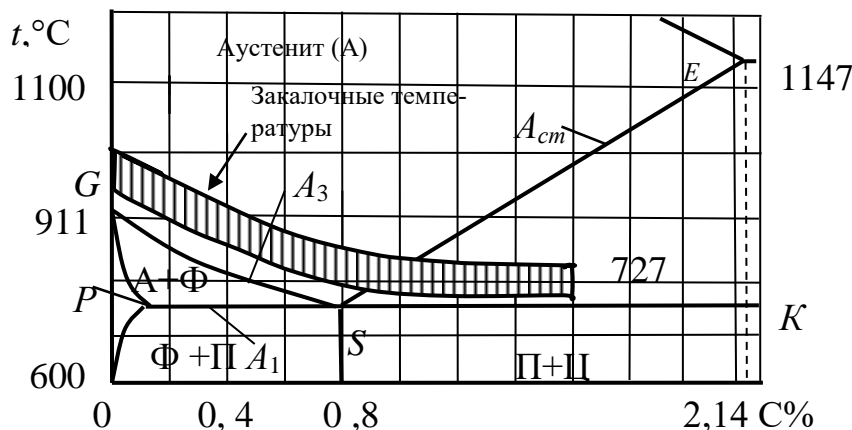


Рис. 6.4. Интервал закалочных температур (заштрихованный)

При закалке (особенно при охлаждении в воду) возникают большие внутренние напряжения, которые могут привести к появлению трещин. Охлаждение в минеральном масле происходит менее интенсивно, чем в воде, что позволяет в легированных сталях снизить уровень внутренних напряжений. В практике термической обработки применяются специальные способы закалки, уменьшающие внутренние напряжения: с подстуживанием, прерывистая в двух средах, ступенчатая, изотермическая.

Способность стали подвергаться закалке характеризуется *закаливаемостью* и *прокаливаемостью*.

Под *закаливаемостью* понимают способность стали повышать твёрдость в результате закалки (рис. 6.5).

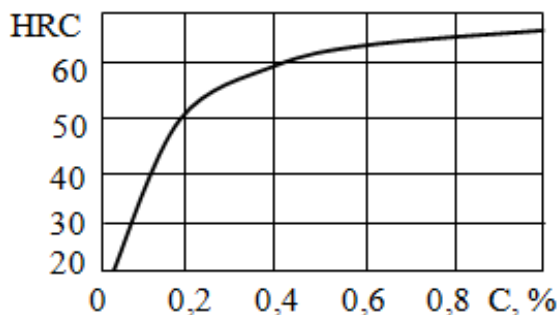


Рис. 6.5. Влияние содержания углерода на закаливаемость стали

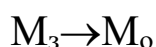
Закаливаемость стали определяется величиной твёрдости и в первую очередь зависит от содержания углерода. Чем больше в мартенсите углерода, тем выше его твёрдость.

Под *прокаливаемостью* понимают способность стали получать закалённый слой с мартенситной или троосто-мартенситной структурой и высокой твёрдостью на ту или иную глубину. Прокаливаемость зависит главным образом от наличия в стали легирующих элементов. Сильно повышает прокаливаемость введение марганца, хрома, молибдена и малых присадок бора, а также одновременное введение в сталь нескольких легирующих элементов. Если прокаливаемость не сквозная, то с сердцеvine изделия сохраняются продукты распада аустенита, которые имеют пластинчатое строение, что приводит к снижению механических свойств.

Отпуск стали

Отпуск – это операция термической обработки, которая заключается в нагреве закалённой стали до температуры ниже критической A_{c1} , выдержке при этой температуре и последующем охлаждении на воздухе или в масле. Отпуск проводится с целью получения необходимого комплекса свойств и снятия внутренних напряжений. Это окончательная термическая обработка. Различают три вида отпуска: низкий, средний, высокий.

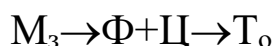
Низкий отпуск проводится при температуре 150-200°C. В результате отпуска мартенсит закалки превращается в мартенсит отпуска, у которого степень тетрагональности близка к единице:



При этом на 1/3 снимаются внутренние напряжения. Закалённая сталь после низкого отпуска сохраняет высокую твёрдость, поэтому такому виду отпуска подвергают инструмент и детали, прошедшие поверхностную закалку, цементацию или нитроцементацию.

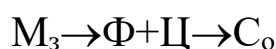
Средний отпуск проводят при температуре 350-500 °C главным образом для пружин и рессор. Такой вид отпуска обеспечивает высокие пределы упругости, выносливости, так как в процессе от-

пуска мартенсит распадается на дисперсную феррито-цементитную смесь, называемую троститом отпуска:



При этом на 2/3 снимаются внутренние напряжения. Тростит отпуска отличается от тростита формой карбидов: у тростита отпуска сферическая форма карбидов, а у тростита – пластинчатая. Изменением формы карбидов и объясняются различия в их свойствах.

Высокий отпуск проводят при температуре 500-680 °С. В этом температурном интервале идёт процесс укрупнения (коагуляция) и округления карбидных частиц (коалесценция), в результате чего формируется структура зернистого строения, называемая сорбитом отпуска:



В результате отпуска полностью снимаются внутренние напряжения.

Закалка с высоким отпуском называется *улучшением*. Улучшение одновременно повышает прочностные характеристики и пластичность и особенно ударную вязкость стали. Это обусловлено тем, что в результате распада аустенита формируется феррито-цементитная смесь пластинчатого строения, а в результате распада мартенсита – зернистого строения.

Улучшению подвергают среднеуглеродистые конструкционные стали (0,3-0,5 % С), к которым предъявляются высокие требования по пределу выносливости и ударной вязкости.

Легирующие элементы замедляют происходящие при отпуске процессы, поэтому в легированной стали при одной и той же температуре отпуска можно получить более высокие прочностные характеристики, чем в углеродистой.

Вопросы для самопроверки

1. Укажите на диаграмме Fe-Fe₃C геометрические места точек A_{c1} и A_{c3} .
2. Какое превращение происходит в стали при нагреве выше A_{c1} ?

3. Что такое С-образная диаграмма?
4. Что такое инкубационный период?
5. Охарактеризуйте перлит, сорбит и тростит. Что между ними общего и чем они отличаются? Сравните их свойства.
6. Что представляет собой бейнит?
7. Какой физический смысл критических точек M_n и M_k ?
8. Что представляет собой мартенсит? Какую он имеет решетку?
9. Что такое критическая скорость охлаждения?
10. Как влияют легирующие элементы на диаграмму изотермического распада аустенита?
11. Перечислите особенности мартенситного превращения.
12. Что такое отжиг?
13. Что такое закалка?
14. В чём заключается нормализация?
15. Как выбирают температуру нагрева под закалку для заэвтектоидных сталей?
16. В какой среде охлаждают при закалке углеродистые и легированные стали?
17. Что такое отпуск и какие виды отпуска Вам известны?
18. Как изменяются механические свойства стали с повышением температуры отпуска?

Литература: [1, с. 169-210; 2, с. 323-344]

РАЗДЕЛ 7. СПОСОБЫ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Для получения большой твёрдости в поверхностном слое с сохранением вязкой сердцевины, что обеспечивает износостойкость и одновременно высокую динамическую прочность детали, применяют поверхностную закалку или химико-термическую обработку.

Тема 1. Поверхностная закалка

Основные вопросы темы

Виды поверхностной закалки. Свойства и структура сердцевины и поверхности деталей.

Указания к изучению темы

Поверхностная закалка осуществляется с газопламенным нагревом или нагревом токами высокой частоты (ТВЧ) – индукционная закалка.

Закалка ТВЧ осуществляется индуктором, по которому проходит переменный ток, что создаёт переменное магнитное поле. В поверхностном слое изделия возникают вихревые токи, разогревающие его поверхность.

Индукционный нагрев сокращает длительность термической обработки, даёт возможность получить мелкое зерно, создаёт условия для автоматизации процесса и включения его в поточную линию механической обработки без разрыва технологического цикла.

После поверхностной закалки проводят низкий отпуск для снятия внутренних напряжений. Структура поверхностного слоя – мартенсит отпуска, который имеет высокую твёрдость и износостойкость, а сердцевина сохраняет достаточную вязкость. Поверхностной закалке подвергают среднеуглеродистые стали – 45, 40Х, 40Г2 и др.

Тема 2. Химико-термическая обработка

Основные вопросы темы

Химико-термическая обработка. Цементация. Азотирование. Нитроцементация.

Указания к изучению темы

Химико-термическая обработка (ХТО) заключается в насыщении поверхности изделия одним или несколькими элементами, которые поступают из окружающей среды при высокой температуре. Процесс ХТО включает три этапа: 1) диссоциацию; 2) адсорбцию; 3) диффузию. Физической основой ХТО является поглощение атомов насыщающего элемента поверхностью детали и диффузионное перемещение этих атомов в поверхностном слое внутрь изделия, поэтому основными параметрами техпроцесса является температура и время выдержки. При ХТО важную роль играют свойства

среды, в которой производится насыщение. Эта среда может быть жидкой, газообразной или твёрдой.

Основные виды ХТО: цементация, азотирование, нитроцементация, насыщение поверхности различными элементами, в том числе металлами (бором, хромом, кремнием, алюминием, цинком и др.).

Цементация

Цементация – заключается в насыщении поверхности углеродом. Она применяется для низкоуглеродистых сталей с содержанием $C \leq 0,25$ % – незакаливаемых, что позволяет сохранять вязкую сердцевину: сталь 20, 18ХГТ, 20Х и др.

Различают цементацию в твёрдом (древесный уголь) и газообразном (природный газ) карбюризаторе. Температура цементации – 910-930°C, слой глубиной $\approx 1,2 - 1,5$ мм образуется за 6-12 часов. После цементации проводится закалка и низкий отпуск. При этом поверхность приобретает структуру высокоуглеродистого мартенсита с очень высокой твёрдостью, а сердцевина сохраняется малоуглеродистой – вязкой и пластичной.

Недостатки цементации: высокая температура нагрева, что приводит к короблению, большая длительность процесса.

Азотирование

Азотирование – представляет собой насыщение поверхности изделий азотом в атомарном состоянии, который получается при разложении амиака. Температура нагрева – 500-520 °С, глубина слоя – 0,2-0,5 мм. Время азотирования – 0,01 мм слоя образуется за 1 час. Высокая твёрдость азотированного слоя обусловлена в основном двумя факторами: получением азотистого феррита и образованием твёрдых нитридов.

Азотированию подвергают стали 38ХМЮА, 38ХМЮ, которые содержат хром, алюминий, молибден – легирующие элементы, образующие твёрдые нитриды.

Достоинства азотирования:

- 1) высокая твёрдость и износостойкость поверхности;

- 2) отсутствие коробления, т.е. этот метод ХТО можно применять для очень точных деталей;
- 3) повышение коррозионной стойкости;
- 4) повышение предела выносливости за счёт образования в поверхностном слое сжимающих напряжений;
- 5) твёрдость сохраняется до высокой температуры (гильзы цилиндров).

Нитроцементация

Нитроцементация – процесс одновременного насыщения поверхности азотом и углеродом ведётся в смеси газов CH_4 и NH_3 . Температура процесса – 840-860 °С, глубина слоя – 0,8-1,0 мм. После нитроцементации проводится закалка и низкий отпуск.

Достоинства по сравнению с цементацией и азотированием:

- 1) меньшая, чем при цементации температура нагрева способствует сокращению брака от коробления;
- 2) более высокая, чем после цементации твёрдость, так как образуются карбонитридные фазы;
- 3) большая, чем после азотирования глубина упрочнённого слоя.

Вопросы для самопроверки

1. Что представляет собой химико-термическая обработка?
2. Из каких стадий состоит любая химико-термическая обработка?
3. Что представляет собой цементация?
4. Какие Вы знаете два способа проведения цементации?
5. Охарактеризуйте технологические параметры цементации: температуру, скорость, глубину слоя.
6. В каких пределах находится содержание углерода в поверхностном слое после цементации?
7. Какие свойства обеспечивает цементация?
8. Какая термическая обработка следует после цементации?

9. Укажите структуру в поверхностном слое и в сердцевине детали после окончательной термической обработки, следующей за цементацией.

10. В чем заключается азотирование?

11. За счет чего достигается высокая твердость азотированного слоя?

12. Какая термическая обработка предшествует азотированию?

13. При какой температуре проводят азотирование?

14. Что такое нитроцементация? В чем ее преимущества по сравнению с цементацией?

Литература: [1, с. 219-241; 2, с. 349-355]

РАЗДЕЛ 8. КОНСТРУКЦИОННЫЕ ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Тема 1. Основы теории легирования

Основные вопросы темы

Основы теории легирования. Легирующие элементы. Классификация легированных сталей.

Указания к изучению темы

Легированные – это стали, в которые при выплавке добавляют определённое количество специальных (легирующих) элементов для получения необходимых структур и свойств.

Наличие легирующего элемента обозначают буквами: А – азот (если буква находится внутри марки), Б – ниобий, В – вольфрам, Г – марганец, Д – медь, Е – селен, К – кобальт, М – молибден, Н – никель, Р – бор, С – кремний (в автоматных сталях – свинец), Т – титан, Ф – ванадий, Х – хром, Ц – цирконий (в автоматных сталях – кальций), Ю – алюминий.

Количество легирующего элемента указывается цифрами, следующими за буквой. Цифры перед буквой обозначает содержание углерода в сталях (в сотых долях процента). Например, 20Х2Н4А – 0,2 % С, 2 % Cr, 4 % Ni, А – высококачественная сталь. Если после

буквы цифра не указана, то легирующего элемента ~1 %. Например, 40ХГН – 0,4 % С, 1 % Cr, 1 % Mn, 1 % Ni.

Некоторые легирующие элементы добавляются в небольших количествах: молибден, ванадий, медь – в десятых долях процента, титан, ниобий, азот – в сотых долях процента, бор – в тысячных долях процента.

Например, сталь 40Х2МФ – 0,4 % С; 2 % Cr; 0,1 % Мо; 0,1 % V. Сталь 20ХНР – 0,2 % С; 1 % Cr; 1 % Ni; 0,001 % В.

Буква Л в конце марки означает, что сталь литейная (для отливок) – 15Л, 35ГЛ.

Если буква А стоит в начале марки – это автоматная сталь (А30), а в середине марки указывает на содержание азота (35ХАФ – 0,35 % С; 1 % Cr ; 0,01 % N; 0,01 % V).

Легирующие элементы оказывают влияние на вид диаграммы состояния. Такие элементы, как Si, W, Ti, V повышают критические точки A_1 и A_3 , а Mn и Ni их снижают; Cr и Mo повышают A_1 и снижают A_3 , смещают критические точки S и E влево. Легирующие элементы оказывают влияние на свойства феррита и карбидов. Марганец и кремний наиболее интенсивно упрочняют феррит, но при этом снижается пластичность и ударная вязкость. Положительно влияет только Ni.

По влиянию на карбидную фазу легирующие элементы делятся на карбидообразующие (Cr, Mn, W, Ti, V, Co) и некарбидообразующие (Ni, Si, Al, Cu). Карбидообразующие, образуя специальные карбиды ($Cr_{23}C_6$, WC, Mo_2C), обеспечивают очень высокую твердость.

Основная часть легирующих элементов повышает прокаливаемость стали, что обеспечивает высокий уровень свойств в большом сечении изделия после упрочняющей термической обработки. Это основная цель легирования конструкционных сталей.

Большинство легирующих элементов, кроме Mn, Si, Ce, Co и Ni, интенсивно измельчают зерно стали, тем самым повышая весь комплекс свойств и, главное, сопротивление хрупкому разрушению. Такие элементы как Ni и Cr в количестве до 0,5 % значительно снижают порог хладноломкости. Остальные – повышают его.

Наилучший уровень свойств сталей может быть достигнут только при комплексном легировании, как карбидообразующими,

так и некарбидообразующими элементами (например, 40ХН, 3ХГС, 10ХСНД). Лучше легировать несколькими карбидообразующими, чем одним в большом количестве.

Все легированные стали не имеет смысла использовать без термической обработки.

Легированные стали по химическому составу делятся на:

- низколегированные: суммарное количество легирующих элементов $\Sigma \text{л.э.} < 2,5\%$;
- среднелегированные: $\Sigma \text{л.э.} = 2,5-10\%$;
- высоколегированные: $\Sigma \text{л.э.} > 10\%$.

Конструкционные легированные стали, предназначенные для изготовления деталей машин, делятся по назначению на четыре группы:

- цементируемые: $C < 0,3\%$;
- улучшаемые: $0,3 \leq C \leq 0,55\%$;
- рессорно-пружинные: $0,55 < C \leq 0,7\%$;
- шарико-подшипниковые: $\sim 1\%$.

Тема 2. Классификация легированных сталей

Основные вопросы темы

Легированные стали: цементируемые, улучшаемые, рессорно-пружинные, шарико-подшипниковые. Маркировка. Области применения.

Указания к изучению темы

Цементируемые стали

Цементируемые стали содержат до 0,3 % С и обеспечивают после цементации, закалки и низкого отпуска получение износостойкой поверхности в сочетании с вязкой пластичной сердцевиной, способной воспринимать ударные и знакопеременные нагрузки.

В зависимости от степени легирования цементируемые стали делятся на три группы:

- 1 группа – с неупрочняемой сердцевиной;
- 2 группа – со слабо упрочняемой сердцевиной;

3 группа – с сильно упрочняемой сердцевиной.

Стали с неупрочняемой сердцевиной – это стали с низкой прокаливаемостью (сталь 15, 20, 20Г). Из этих сталей изготавливают мелкие ненагруженные детали. После цементации и закалки с низким отпуском структура на поверхности – мартенсит отпуска. Для повышения прокаливаемости стали легируют хромом, никелем: 20Х, 20ХН.

Стали с сильно упрочняемой сердцевиной – комплекснолегированные (20ХГР, 25ХГМ, 18ХГТ) со сквозной прокаливаемостью. В сердцевине получают малоуглеродистый мартенсит, который при достаточно высокой прочности не теряет пластичности и не является хрупким. Эти стали используют для тяжело нагруженных изделий (зубчатые колёса, червяки, валы, пальцы).

Улучшаемые стали

Стали этой группы содержат 0,3–0,5 % С – 40Х, 38ХС, 40ХН, 40ХГНР, 35ХГТ.

Режим термической обработки сталей – улучшение (закалка и высокий отпуск). Структура после такой обработки – сорбит отпуска, который обеспечивает достаточно высокую прочность в сочетании с высокой пластичностью и ударной вязкостью. Такой термической обработке подвергают детали, которые испытывают знакопеременные и ударные нагрузки: вал ротора, стартера, приводной рычаг стартера, вал стартера, зубчатый сектор моторедуктора, шестерню привода стартера, шатун, распределительный вал и др.

Чем больше сечение детали, тем более легированную сталь следует применять. В улучшаемых сталях можно получить сквозную прокаливаемость в сечениях 60-100 мм (40ХГНР и 38ХНЗМФ соответственно).

Рессорно-пружинные стали

Эти стали содержат 0,5–0,8 % С и предназначены для изготовления рессор и пружин, которые должны иметь высокий предел текучести. Марки сталей: 65Г, 60С2, 50ХФА. Необходимый комплекс свойств достигается термической обработкой, состоящей из закалки

и среднего отпуска. Структура стали – тростит отпуска. Стали используют для изготовления: упругой пластины показателя температуры двигателя, пружины привода стартера, пружины клапана, пружины манометра, рессор, мембран и др.

Шарико-подшипниковые стали

Шарико-подшипниковые стали предназначены для изготовления подшипников качения. Эти стали должны обладать высокой твёрдостью и износостойкостью, поэтому содержат высокое количество углерода.

Марки сталей: ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ. Цифры означают содержание хрома в десятых долях процента (0,6–1,5 % соответственно). Термическая обработка – закалка и низкий отпуск для получения высокой твёрдости (62-65 HRC), что обеспечивает необходимую износостойкость и контактную выносливость подшипникам. Стали легируют Cr, Mn и Si для получения высокой прокаливаемости.

Термическая обработка: закалка и низкий отпуск, структура – мартенсит отпуска. Из этих сталей изготавливают кольца, шарики и ролики подшипников.

Вопросы для самопроверки

1. Какие стали относятся к цементуемым? Приведите примеры марок цементуемых сталей.
2. Что такое улучшаемые стали? Приведите примеры марок улучшаемых сталей.
3. Какие требования предъявляются к рессорно-пружинным сталям?
4. Какой термической обработке подвергают рессорно-пружинные стали?
5. Какие требования предъявляются к шарико-подшипниковым сталям?
7. Как маркируются шарико-подшипниковые стали?
8. Какой термической обработке подвергают шарико-подшипниковые стали?

Литература: [1, с. 247-261; 2, с. 368-371]

РАЗДЕЛ 9. СПЛАВЫ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Основные вопросы темы

Сплавы на основе меди. Латунни. Бронзы. Сплавы на основе алюминия.

Указания к изучению темы

Сплавы на основе меди

Свойства меди: плотность – $8,93 \text{ г/см}^3$, $t_{\text{пл}}=1083 \text{ }^\circ\text{C}$. Медные сплавы обладают достаточно высоким уровнем, физических, механических и технологических свойств, износостойкостью и коррозионной стойкостью.

Сплавы на основе меди делятся на два больших класса – латуни и бронзы.

Латунями называют сплавы меди с различными легирующими элементами, среди которых цинк является основным.

Бронзами называются сплавы меди с различными легирующими элементами, среди которых может быть и цинк, но в небольших количествах.

По технологическому признаку латуни и бронзы делятся на *деформируемые* (изделия изготавливают обработкой давлением) и *литейные* (изделия получают методом литья).

Принята следующая маркировка медных сплавов: сплавы обозначаются буквами «Л» (латунь) и «Бр» (бронза), после чего следуют русские буквы, указывающие легирующие элементы: О – олово, Ц – цинк, Мц – марганец, Ж – железо, Ф – фосфор, Б – бериллий, Х – хром, Су – сурьма, С – свинец, К – кремний и др.

Цифры, следующие за буквами, показывают количество легирующих элементов в процентах.

Например, деформируемые латуни маркируются следующим образом: Л70 – латунь содержит 70 % меди и 30 % цинка; ЛА85-0,5 – 85 % меди, 0,5 % алюминия и 14,5 % свинца. Деформируемые ла-

туни маркируются следующим образом: БрО10 – бронза содержит 10 % олова, 90 % меди; БрОЦС 4-4-2,5 – содержит 4 % олова, 4 % цинка, 2,5 % свинца, 89,5 % меди.

Маркировка литейных латуней и бронз несколько отлична – у них цифры после каждой буквы указывают на содержание легирующего элемента. Например, латунь ЛЦ40Мц1,5 – содержит 40 % цинка, 1,5 % марганца, 58,5 % меди; БрА10ЖЗМц2 – бронза, содержит 10 % алюминия, 3 % железа, 2 % марганца, 85 % меди.

Латуни

Основным легирующим элементом в латунях является цинк. Цинк образует с медью ограниченные твёрдые растворы замещения. Цинк оказывает уникальное влияние на свойства латуни: он до определённого предела повышает и пластичность и прочность. Однако по достижении 38 % цинка начинает падать пластичность сплава, а при достижении 42 % – и прочность. Поэтому промышленное применение нашли сплавы с содержанием не более 38 % цинка.

Латуни по химическому составу делят на простые и сложные. Простые: Л68 (патронная латунь поддаётся холодной вытяжке), Л70, Л90 и др. применяются при изготовлении патронов, бачков, трубок, клапан топливного бака. Сложные: ЛС59-1 – автоматная латунь, применяется при изготовлении тройников, толкателей карбюраторов, втулка тормозных колодок; Л070-1 – морская латунь, отливка имеет повышенную плотность, коррозионную стойкость. Из неё изготавливается арматура кораблей.

Латуни могут применяться также в виде антифрикционных материалов: ЛК80-3.

Бронзы

Бронзы – это сплавы меди со всеми элементами, в том числе и цинком. Бронзы имеют высокую прочность (обычно $\sigma_{\text{в}} \leq 600-800$ МПа, но может достигать 1300 МПа), что позволяет применять их в тяжело нагруженных узлах. По химическому составу делятся на простые и сложные.

Простые бронзы: БрС30 (30 % свинца, остальное – медь) – антифрикционная бронза, применяется в качестве материала вкладышей подшипников скольжения; БрО6 (6 % олова, остальное – медь); БрБ2 (2 % бериллия, остальное – медь), это самый лучший материал для изготовления пружин: $\sigma_{\text{в}} \leq 1300$ МПа. Сложные бронзы: БрАЖ9-2 (9 % - алюминия, 2 % - железа, остальное – медь), применяется для изготовления червячных колёс $\sigma_{\text{в}} \leq 800$ МПа; БрОЦС5-5-5 (5 % – олова, 5% – цинка, 5% – свинца, остальное – медь), применяется для изготовления вкладышей для шатунов, втулок коленчатых валов, пружин для клапанов топливных насосов).

Бронзы – это более дорогой медный сплав, чем латунь, так как в них используются более дорогие легирующие элементы.

Сплавы на основе алюминия

Алюминий – металл серебристого цвета, имеет плотность – 2,7 г/см³, температуру плавления – 660 °С, высокую тепло- и электропроводность, легко покрывается окисной плёнкой.

Сплавы на основе алюминия делятся по способу получения на:

- деформируемые;
- литейные;
- порошковые.

В зависимости от возможности упрочнения термической обработкой:

- упрочняемые термической обработкой;
- не упрочняемые термической обработкой.

Деформируемые сплавы имеют высокую технологическую пластичность и используются для изготовления прутков, профилей, труб различными способами пластической деформации (прокаткой, ковкой, прессованием и др.).

Деформируемые алюминиевые сплавы маркируются по двум системам – буквенно-цифровой и цифровой.

По буквенно-цифровой системе согласно ГОСТ 4784-74 деформируемые сплавы маркируются буквами и цифрами. В этой маркировке не заложено какой-либо системы. Отдельным группам присвоены определённые буквы, внутри группы сплавы различаются номером, который стоит после букв. Так например, *дуралюмины*

(алюминиевые сплавы, содержащие медь и магний) обозначаются буквой Д (Д1, Д16). По новой системе согласно ДСТУ11069-01 алюминиевые сплавы маркируют цифрами. Например, Д16 – 1160.

По способности упрочняться термической обработкой алюминиевые сплавы делятся на упрочняемые термической обработкой и неупрочняемые.

Упрочняющая термическая обработка дуралюминов, где основным легирующим элементом является медь, заключается в закалке с последующим старением и основана на переменной ограниченной растворимости твердых растворов алюминия с медью и другими легирующими элементами.

На рис. 9.1 представлен алюминиевый угол диаграммы Al–Cu, поскольку основным упрочняющим легирующим элементом дуралюминов является медь. Как видно из диаграммы, при температуре 548 °С в алюминии растворяется максимальное количество меди 5,7 %, а при комнатной – всего 0,5 %. В отожженном состоянии структура сплава, содержащего более 0,5 % Cu, состоит из α -твердого раствора на основе алюминия и избыточных кристаллов CuAl_2 .

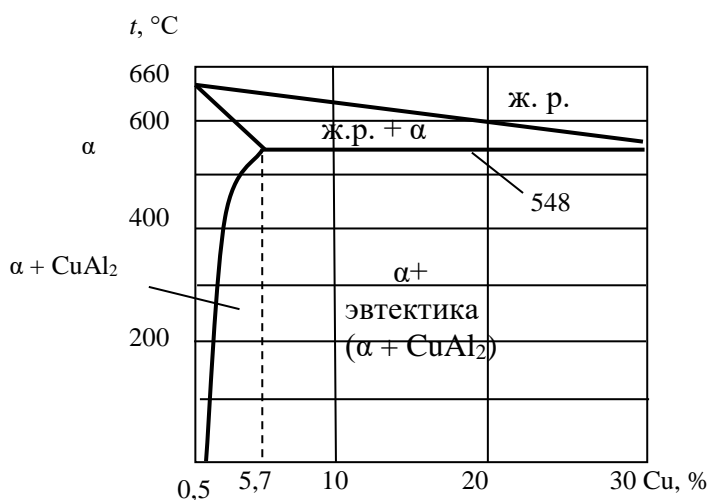


Рис. 9.1. Алюминиевый угол диаграммы Al-Cu

Закалка дуралюмина, содержащего ~5 % Cu, заключается в нагреве сплава выше линии ограниченной растворимости (495–505 °С), выдержке при этой температуре и быстром охлаждении в воде. Нагрев приводит к растворению избыточных фаз, а при быстром

ром охлаждении фиксируется структура пересыщенного твердого раствора меди в алюминии. Прочность и твердость в результате закалки несколько повышаются и пластичность сохраняется высокой. Это позволяет производить пластическое деформирование закаленного дуралюмина в холодном состоянии.

Пересыщенный твердый раствор является неустойчивым и из него выделяется химическое соединение CuAl_2 . Этот процесс называется *старением*. Если старение происходит при комнатной температуре, то оно называется *естественным*. При этом достигается максимальное упрочнение сплава.

Если старение происходит при повышенной температуре, то оно называется *искусственным*. При искусственном старении происходит укрупнение частиц CuAl_2 , что приводит к некоторому снижению прочности по сравнению с естественным старением.

Литейные алюминиевые сплавы согласно ДСТУ 1583-93 маркируются буквой А (алюминиевые сплавы), после которой ставят буквы, соответствующие определённому легирующему элементу (например, К – кремний, М – медь и др.), и цифры, показывающие содержание легирующего элемента в процентах. Например, сплав АК12М2 содержит ~ 12 % кремния, 2 % меди.

Литейные сплавы на основе алюминия являются сплавами состава близкого к эвтектическому. Большинство литейных сплавов в качестве основного легирующего элемента содержат кремний. Эти сплавы называют *силуминами*: АК12 (12 % кремния), многокомпонентный силумин АК9М4.

Следует отметить цинковые силумины, которые содержат (10–14 %) Zn и (6–8 %) Si. Цинк, растворяясь в алюминии, упрочняет твёрдый раствор и позволяет получать отливки с высокими механическими свойствами без применения термической обработки. Такой сплав модифицируется натрием и применяется для сложных по конфигурации и тяжело нагруженных деталей.

Вопросы для самопроверки

1. Почему содержание цинка в латунях не должно превышать 40-45 %?
2. Какими элементами легируют бронзы?

3. Как делятся латуни по технологическому признаку?
4. Как маркируются латуни?
5. На какие группы делятся бронзы по химическому составу?
6. Как маркируются деформируемые бронзы?
7. Как маркируются литейные бронзы?
8. Как классифицируются алюминиевые сплавы по способу изготовления?
9. Что представляет собой дуралюмин?
10. Почему дуралюмин можно подвергать упрочняющей термической обработке и в чем она заключается?
11. Приведите маркировку литейных алюминиевых сплавов.
Литература [1, с. 290-309; 2, с. 392-400]

Список литературы

1. Материаловедение : учебник / С. С. Дьяченко, И. В. Дощечкина, А. А. Мовлян, Е. И. Плешаков. – Харьков : Изд-во ХНАДУ, 2010. – 464 с.
2. Технология конструкционных материалов и материаловедение : учебное пособие / И. П. Гладкий, В. И. Мощенок, В. П. Тарабанова, Н. А. Лалазарова, Д. Б. Глушкова. – Харьков: ХНАДУ, 2011. – 460 с.
3. Пахолок А.П. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали / А. П. Пахолок, О. А. Пахолок. – Львів : Вид-во «Світ», 2005. – 172 с.
4. Гуляев А.П. Металловедение : учебн. для вузов, 6-е изд., перераб. и доп. / А. П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1986. – 544 с.
5. Лахтин Ю.М. Материаловедение : учебн. для машиностр. вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.
6. Арзамасов Б.Н. Материаловедение : учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с.

Учебное издание

Методические указания к самостоятельной работе
по дисциплине «Конструкционные материалы» для студентов
специальности 6.050702

Составители: Дощечкина Ирина Васильевна
Лалазарова Наталия Алексеевна

Ответственный за выпуск В.И. Мощенок

Редактор

Технический редактор
Компьютерная вёрстка

План 2014р. Поз.

Подписано к печати . Формат 60×84 1/16
Бумага газетная. Гарнитура Times New Roman Cyr.

Печать RISO. услов. печать лист. 2,5. обл.-вид. лист. 3,0
Зам. № Тираж 50 шт. Цена договорная.

Издательство
Харьковского национального автомобильно-дорожного
университета